

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

*А. В. Медведев, Л. Б. Ликумович*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

с использованием платформы  
NI ELVIS II

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
2020

*Медведев А. В., Лиокумович Л. Б.* Исследование пассивных электрических цепей с использованием платформы NI ELVIS II / А. В. Медведев, Л. Б. Лиокумович. – СПб., 2020. – 19 с.

Пособие соответствует образовательному стандарту высшего образования Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по направлениям подготовки бакалавров и магистров «Радиотехника» (11.03.01 и 11.04.01), «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (11.03.02 и 11.04.02), «Электроника и нанoeлектроника» (11.03.04 и 11.04.04).

Рассматриваются методы измерения простейших электрических RC и LRC цепей с использованием виртуальных измерительных приборов, входящих в стандартный комплект измерительной платформы NI ELVIS II и устанавливаемых вместе с драйвером NI-ELVISmx. Изучаются методы измерения параметров элементов, переходные и амплитудно-частотные характеристики интегрирующих и дифференцирующих RC цепей и колебательного контура.

Материал учебно-методического пособия также может быть полезен бакалаврам и магистрам направлений подготовки 16.03.01 «Техническая физика» по курсам, связанным с изучением современных методов автоматизации физического эксперимента, совершенствованием экспериментальных методов исследования физических процессов и явлений.

## Введение

Целью работы является практическое изучение свойств простейших пассивных электрических цепей (последовательной RC-цепи и колебательного контура) и описывающих их параметров, приобретение навыков использования современных радиоизмерительных приборов и интерпретации результатов измерений.

Лабораторная работа предусматривает выполнение ряда измерений (посредством измерительного комплекса на основе платформы ELVIS II компании National Instruments), а затем составление отчета о проделанной работе и полученных результатах. В ходе измерений получаемые результаты заносятся в протокол, а также сохраняются в виде файлов с изображением показаний панелей виртуальных приборов и файлов с измеренными данными. Часть пунктов программы работы целесообразно выполнять в ходе подготовки отчета, поэтому при выполнении измерений их рекомендуется пропустить (такие пункты отмечены пояснением "ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА").

Программа работы предполагает, что студенты *предварительно ознакомлены с общими принципами функционирования платформы ELVIS II* (в том числе со структурой панелей макетной платы и основами применения линейки стандартных виртуальных приборов National Instruments для измерений с платформой ELVIS II) и с ними *были проведены вводные лекционные и практические занятия по работе с данной аппаратурой*.

Работа состоит из четырех частей, выполняемых последовательно. Каждая часть выполняется ориентировочно в течение 1–1,5 академических часов, разные части работы могут выполняться на разных занятиях. Программа составлена так, что отчет по уже выполненной части работы может составляться до выполнения следующих частей работы, однако после выполнения всех частей работы студенты должны составить и представить преподавателю полный отчет о выполнении лабораторной работы.

Пункты программы работы (абзацы, начинающие новый пункт отмечены буквами «а)», «б)», «в)» ...) необходимо выполнять последовательно, четко соблюдая указанные требования. Перед выполнением очередного пункта программы работы, следует внимательно прочитать этот пункт до конца.

При выполнении работы в лаборатории нужно строго соблюдать правила техники безопасности.

Запрещается запускать на компьютере какие-либо программы и открывать какие-либо папки, кроме указанных в описании лабораторной работы (или с разрешения преподавателя). При сомнении в корректной работе аппаратуры, правильности получаемых результатов, появлении окон с сообщениями и предупреждениями следует незамедлительно обратиться к преподавателю.

## ПРОГРАММА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

---

### Начало работы

Для выполнения измерений каждой бригаде выдается комплект элементов, имеющий номер от 1 до 15, а также два соединительных кабеля с разъемами BANANA и два коаксиальных кабеля с разъемами BNC. При выполнении всех работ бригады должны использовать один и тот же набор элементов.

Студенты также используют необходимые им по ходу работы тонкие цветные соединительные провода. По окончании каждого занятия все элементы необходимо сдать преподавателю.

При выполнении данной работы из комплекта элементов необходимо использовать резистор «R1», конденсатор «C1» и катушку индуктивности «L1». Маркировка элементов нанесена белой краской на миниплаты с элементами, снабженные разъемами для установки в гнезда макетной платы ELVIS II.

- а) Включите компьютер и дождитесь, пока загрузится операционная система.
- б) Включите питание платформы ELVIS II и питание макетной платы.
- в) Загрузите панель «NI ELVISmx Instrument Launcher», значок которой вынесен на панель задач. В случае появления окон с предупреждениями или вопросами позвоните преподавателя.

### Часть 1. Исследование RC-цепи в режиме гармонических колебаний

#### ***1.1. Измерение параметров элементов RC-цепи и оценка постоянной времени цепи***

- а) Запишите в протокол номинальные значения сопротивления и емкости, указанные на резисторе и конденсаторе (если обозначения на SMD элементах не видны, следует уточнить номинальные параметры у преподавателя).
- б) Измерьте значения сопротивления резистора и емкости конденсатора при помощи мультиметра. Запишите полученные результаты в протокол.

Для проведения измерений запустите программу мультиметра (Digital Multimeter) и проведите измерение фактических значений сопротивления резистора и емкости конденсатора.

При измерении сопротивления резистора его удобно подключать к контактам разъемов «BANANA A», «BANANA B» (гнезда 38 и 39 колодок в левой части макетной платы), а сами разъемы «BANANA» соединить с соответствующими гнездами мультиметра на левой боковой панели корпуса платформы ELVIS II.

При измерении емкости конденсатора его следует вставлять в гнезда «DUT+» (гнезда 29) и «DUT-» (гнезда 30) колодки макетной платы, как показано в окне мультиметра.

- в) Рассчитайте постоянную времени RC-цепи  $\tau$  и частоту среза  $f_c$ .

## ПОЯСНЕНИЕ

Значение постоянной времени  $\tau$  и частоты среза  $f_c$  для  $RC$ -цепи рассчитывается по формулам  $\tau = R \cdot C$  [с],  $f_c = 1/(2\pi \cdot \tau) = 1/(2\pi \cdot R \cdot C)$  [Гц].

г) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА. Сравните измеренные значения параметров элементов с номинальными. Сравните величины  $\tau$  и  $f_c$ , рассчитанные на основании измеренных значений сопротивления резистора «R1» и емкости конденсатора «C1», с оценками, полученными при подстановке в формулы номинальных значений этих элементов.

### 1.2. Измерение АЧХ и ФЧХ интегрирующей $RC$ - цепи.

#### а) Сборка схемы для измерений

Соберите на монтажной плате схему с  $RC$ -цепочкой и подключите ее к приборам ELVIS-II для измерения амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик, согласно схемы, приведенной на рисунке 1.

В качестве источника гармонического сигнала используйте функциональный генератор, для чего подсоедините выход функционального генератора на макетной плате (выход «FGEN» – гнезда 33) ко входу  $RC$ -цепи.

Для контроля входного сигнала  $U_{вх}(t)$  и выходного сигнала  $U_{вых}(t)$  используйте осциллограф, для чего подключите входную и выходную точки цепи входам BNC 1 и BNC 2 на макетной плате (гнезда 42 – 45), а разъемы BNC 1 и BNC 2 платы соедините кабелями со входами CH0 и CH1 осциллографа на боковой поверхности корпуса платформы ELVIS II.

Для соединения источника, осциллографа и цепи общим проводом необходимо соединить проводником вывод конденсатора (не соединенный с резистором) с любым гнездом общей точки «GROUND» на макетной плате, при этом генератор и осциллограф подсоединены к общей точке внутри платформы ELVIS II.

Проверьте собранную схему, в случае необходимости покажите преподавателю.

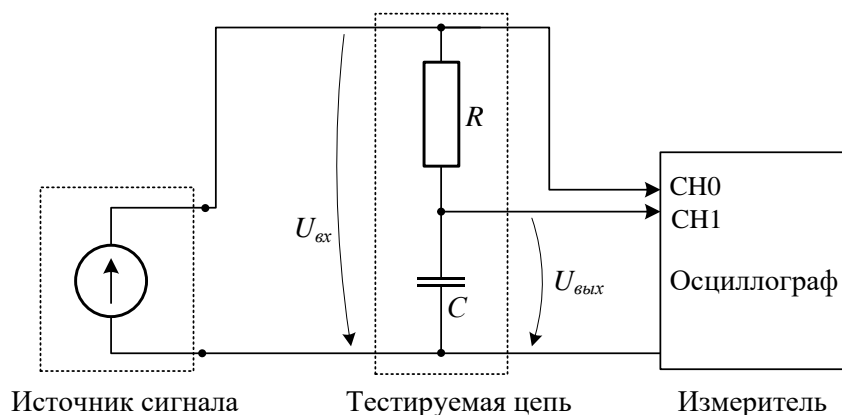


Рисунок 1. Схема интегрирующей  $RC$ -цепи (ФНЧ) с подключенными приборами

#### б) Подготовка приборов

Запустите программы функционального генератора и осциллографа (Function Generator и Oscilloscope).

Установите на панели генератора режим гармонического сигнала с частотой 100 Гц, с размахом сигнала 1 В (Amplitude 1 Vp-p) и подачей сигнала на гнезда макетной платы (Signal Route → Prototyping board). Запустите работу генератора (кнопка "Run").

Установите на панели осциллографа режим индикации обоих каналов с «открытым входом» (Channel 0/1 Settings: Source → SCOPE CH0/1, отметить «Enabled»; Coupling → DC). Установите режим синхронизации по спадающему фронту сигнала в канале CH0 с нулевым порогом (Trigger: type → Edge; Source → Chan 0; Level(V) = 0). Запустите работу осциллографа (кнопка "Run").

Выберите регулировки масштабов таким образом, чтобы было удобно наблюдать практически идентичные гармонические сигналы  $U_{\text{вх}}(t)$  и  $U_{\text{вых}}(t)$  (можно использовать опцию «Autoscale»).

#### в) Предварительные наблюдения сигналов и поиск частоты среза цепи.

Изменяя частоту сигнала генератора и наблюдая по осциллографу входной и выходной сигналы, убедитесь, что при повышении частоты уровень выходного сигнала снижается, а разность фаз между входным и выходным сигналом растет (поскольку интегрирующая RC-цепи соответствует ФНЧ).

Выберите частоту  $f_0$ , для которой коэффициент передачи фильтра близок к значению  $K \approx 1/\sqrt{2}=0,707$ . При этом можно учитывать, что если для входного сигнала был установлен уровень 1 В, то уровень выходного сигнала в [В] равен значению  $K$  (значения уровней сигналов каналов отображаются под полем осциллограммы).

Запишите в протокол значение частоты  $f_0$ , а также значения  $K$  и значение временной задержки между сигналами  $\Delta T$ , наблюдаемые для этой частоты. Для более точного измерения  $\Delta T$  следует при помощи курсоров измерять интервал времени между моментами пересечения входным и выходным сигналами нулевого уровня (для одинакового направления пересечения), выбирая максимально «растянутый» масштаб по шкале времени (минимальное значение масштаба время/деление, при котором оба момента времени еще помещаются на экране).

### ПОЯСНЕНИЕ

Частотная передаточная характеристика линейной цепи – зависимость комплексного коэффициента передачи  $\mathbf{K}$  от частоты, определяемого для гармонического сигнала частоты  $f$  как отношение комплексных амплитуд выходного и входного сигналов:

$$\mathbf{K} = \dot{U}_{\text{м вых}}(f) / \dot{U}_{\text{м вх}}(f).$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цепи – зависимость модуля комплексного коэффициента передачи  $K(f) = |\mathbf{K}(f)|$ , т.е. соотношение амплитуд гармонических колебаний с частотой  $f$  на выходе и входе цепи  $K(f) = U_{\text{м вых}}(f) / U_{\text{м вх}}(f)$ . Понятно, что при измерениях для определения  $K$  можно использовать отношение эффективных значений или размаха гармонических сигналов, причем удобно установить для входного напряжения значение равное 1 В, тогда значение для выходного сигнала в Вольтах будет соответствовать значению  $K$ .

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) линейной цепи определяется как частотная зависимость аргумента комплексного коэффициента передачи  $\varphi(f) = \arg[\mathbf{K}(f)]$ , т.е. разности начальных фаз гармонических колебаний с частотой  $f$  на входе и выходе цепи.

Для ФНЧ на основе RC-цепочки (интегрирующая RC-цепь)  $K(f)$  и  $\varphi(f)$  описываются выражениями  $K(f)=[1+(f/f_c)^2]^{-1/2}$ ,  $\varphi(f) = \arctg(-f/f_c)$ . Пример АЧХ и ФЧХ такого фильтра приведен на рисунке 2.

Связь между фазовым сдвигом  $\varphi$  и временной задержкой  $\Delta T$  между входным и выходным сигналами задается простым соотношением  $\varphi = -2\pi \Delta T f$ .

Выражения, описывающие АЧХ и ФЧХ для случая ФВЧ на основе RC-цепочки (дифференцирующая RC-цепь) имеют вид  $K(f)=[1+(f_c/f)^2]^{-1/2}$ ,  $\varphi(f) = \arctg(f/f_c)$ .

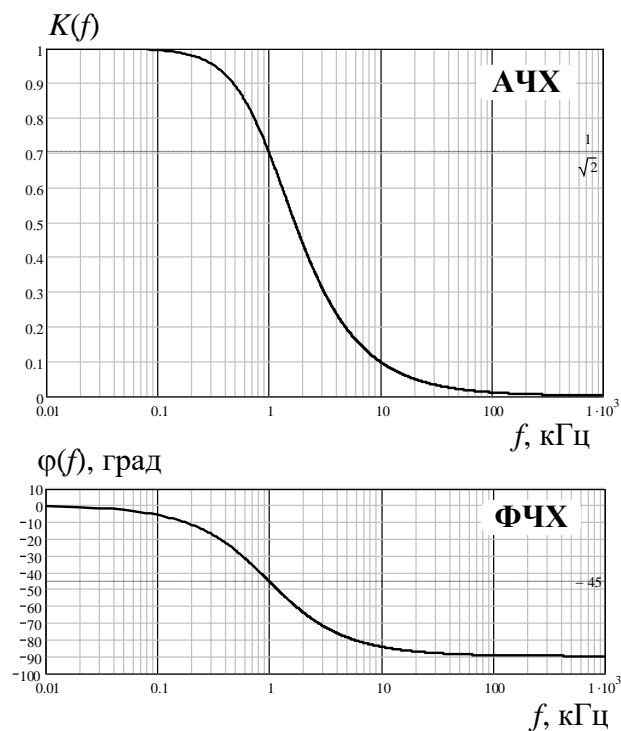


Рисунок 2. Пример амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик ФНЧ на основе интегрирующей  $RC$ -цепочки с частотой среза  $f_c = 1$  кГц.

**г) Измерение точек АЧХ и ФЧХ в области частот выше и ниже частоты  $f_0$ .**

В области частот выше начальной частоты выберите точки с примерными значениями коэффициента передачи 0,3; 0,1; 0,05 и запишите в протокол значения частот  $f$ , а также точные значения  $K$  и  $\Delta T$  на этих частотах.

В области частот ниже начальной частоты выберите точки с примерными значениями коэффициента передачи 0,8; 0,9; 0,99 и запишите в протокол значения частот  $f$ , а также точные значения  $K$  и  $\Delta T$  на этих частотах.

Для двух частот, на которых были сделаны измерения (в области ниже и выше начальной частоты), зафиксируйте и сохраните изображение наблюдаемых осциллограмм<sup>1)</sup>.

Покажите полученные результаты преподавателю.

**д) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** Постройте графики АЧХ и ФЧХ цепи.

Значения фазового сдвига  $\varphi$  вычисляйте по значениям  $\Delta T$ , используя формулу  $\varphi = -2\pi \Delta T f$ . Зависимости  $K(f)$  и  $\varphi(f)$  надо построить в полулогарифмическом масштабе (линейный по вертикали и логарифмический по горизонтали). На графиках отметьте частоту среза  $f_c$ , соответствующую уровню  $K = 0,707$ . Сравните полученные графики с теоретическими зависимостями АЧХ и ФЧХ интегрирующей  $RC$ -цепи.

**е) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** В отчете приведите изображения сохраненных осциллограмм с пояснениями по поводу соответствующих им значениям  $K$  и  $\varphi$ .

<sup>1)</sup> Для сохранения осциллограмм можно использовать копирование изображения активного окна в буфер обмена операционной системы посредством одновременного нажатия клавиш «Alt»+«PrtScrn». После этого изображение может быть сохранено в виде файла-картинки при помощи программы Paint или вставлено в файл протокола к работе, открытый в редакторе MS Word. Так же можно использовать кнопку «Print» на лицевой панели виртуального прибора.

**ж) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** Сравните значения частоты среза  $f_c$ , полученное при измерениях и значение, рассчитанное при выполнении п. 1.1. Сравните значение сдвига фаз на частоте среза с теоретическим значением для  $RC$ -цепи.

## Часть 2. Исследование воздействия импульсного напряжения на $RC$ -цепь

### **2.1. Прохождение импульсного сигнала через $RC$ -фильтр нижних частот (интегрирующая $RC$ -цепь)**

**а) Предварительные наблюдения сигналов на входе и выходе.**

Не меняя ранее собранную схему с интегрирующей  $RC$ -цепью, переключите генератор в режим импульсного сигнала. Установите размах сигнала 1 В со смещением 0.5 В (Amplitude = 1 Vpp; DC Offset = 0.5 V).

Наблюдая осциллограммы входного и выходного напряжения убедитесь, что при достаточно низких частотах выходной импульс практически совпадает с входным, а при увеличении частоты выходной импульс искажается, и амплитуда его снижается. Обратите внимание меняется ли постоянная составляющая сигнала.

Выберите частоты  $f_1$  и  $f_2$ , при которых сигналы выглядят так, как на рисунке 3, а и 3, б. Запишите значения частот в протокол и сохраните изображение осциллограмм.

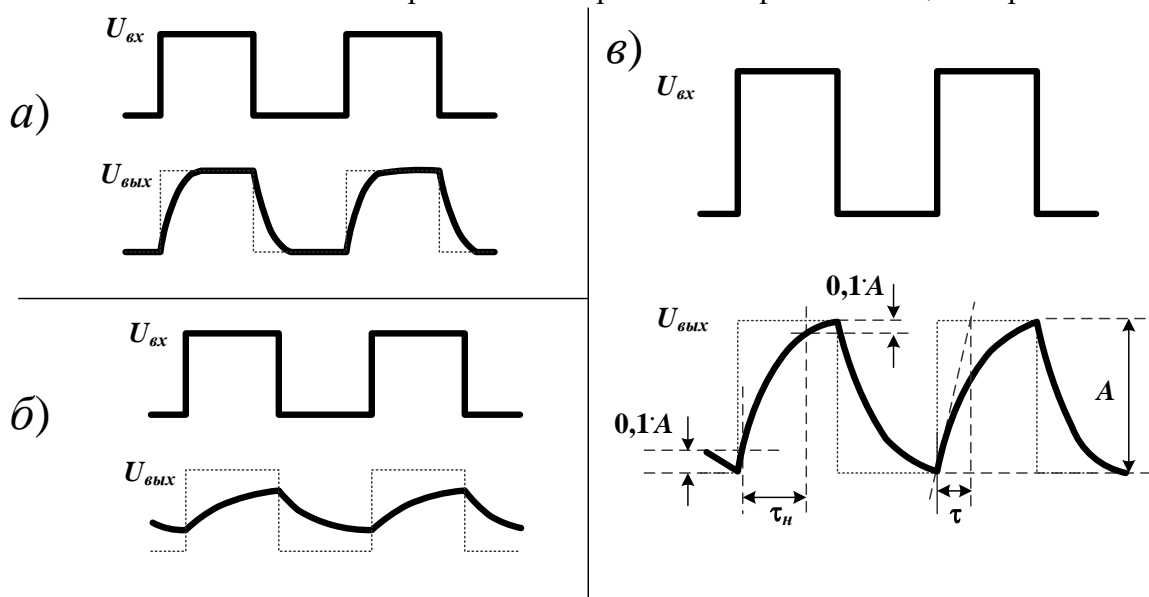


Рисунок 3. Вид импульсов на входе и выходе интегрирующей  $RC$ -цепи (ФНЧ) при  $f \ll f_c$  (а),  $f \sim f_c$  (б),  $f \gg f_c$  (в).

### **ПОЯСНЕНИЕ**

Во временном представлении цепь описывается переходной характеристикой – откликом на входной сигнал в виде ступеньки единичной амплитуды. Для  $RC$ -фильтра нижних частот такая характеристика задается выражением  $h_{\text{ФНЧ}}(t) = 1 - \exp(-t/\tau)$ , для фильтра верхних частот  $h_{\text{ФВЧ}}(t) = \exp(-t/\tau)$ , где  $\tau$  – постоянная времени  $RC$ -цепи. Из этих формул понятно, что искажения прямоугольного импульса при прохождении через  $RC$ -цепь будут иметь вид, показанный на рисунках 3 и 5. Так же из этих выражений следует, что величина  $\tau$  может быть оценена посредством построения касательной к выходному импульсу в момент фронта на входе цепи, как показано на рисунке 3, в и 5, в.



**в) Оценка времени нарастания импульса.**

Установите осциллограф в режим работы «с закрытым входом» (установить режим «АС» в параметрах каналов).

Выберите частоту  $f_3$ , при которой выходной импульс имеет вид, показанный на рисунке 3, в («сглаженный» участок фронта выходного импульса примерно равен длительности входного импульса, но амплитуды импульсов еще остаются равными). Запишите в протокол значение частоты.

Подберите удобный масштаб по вертикали и подберите амплитуду входного сигнала так, чтобы размах выходного сигнала соответствовал 10 делениям сетки в поле осциллограммы. Используя курсоры (значения уровней напряжения в отмеченных курсорами точках и временного интервала между этими точками отображается под осциллограммой), измерьте время нарастания импульса  $\tau_n$ , как показано на рисунке 3, в. Запишите полученный результат в протокол, сохраните изображение осциллограммы с установленными курсорами.

**г) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** Оценка постоянной времени цепи по форме выходного импульса.

Используя сохраненные осциллограммы, по виду выходного сигнала оцените постоянную времени  $\tau$  (как показано на рисунке 3, в).

**д) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** Сравните значения частот  $f_1$ ,  $f_2$ , с частотой среза  $RC$ -фильтра, найденной при выполнении п.1.

**е) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** Сравните измеренное время нарастания импульса  $\tau_n$  и постоянную времени  $\tau$  с расчетом через значения  $R$  и  $C$  (теоретическое соотношение  $\tau_n = 2,2 \cdot \tau = 2,2 \cdot R \cdot C$ ).

**2.2. Прохождение импульсного сигнала через  $RC$ -фильтр верхних частот (дифференцирующая  $RC$ -цепь)**

**а) Сборка схемы для измерений.**

Соберите на монтажной плате схему с дифференцирующей  $RC$ -цепочкой (ФВЧ), подсоединенной к приборам, как показано на рисунке 4 (можно просто поменять местами резистор и конденсатор в исходной схеме).

Проверьте собранную схему, в случае необходимости покажите преподавателю.

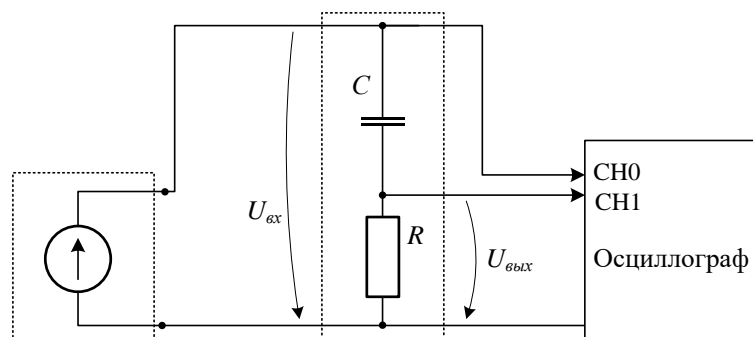


Рисунок 4. Схема дифференцирующей  $RC$ -цепи (ФВЧ) с подключенными приборами

### б) Предварительные наблюдения сигналов на входе и выходе.

Задайте в параметрах генератора размах сигнала 1 В. Установите осциллограф в режим работы «с открытым входом» (установить режим «DC» в параметрах каналов).

Наблюдая осциллограммы входного и выходного сигнала убедитесь, что при достаточно высоких частотах выходной импульс практически совпадает с входным, а при снижении частоты выходной сигнал искажается и дает короткие броски в моменты фронтов входного импульса. Обратите внимание, меняется ли постоянная составляющая сигнала при прохождении цепи.

Выберите частоту  $f_1$ , при которой выходной импульс имеет вид, показанный на рисунке 5, а (незначительные искажения в виде «наклона» горизонтальных участков импульса).

Запишите в протокол значение частоты и сохраните изображение осциллограммы.

Выберите частоту  $f_2$ , при которой выходной импульс имеет вид, показанный на рисунке 5, б («дифференцированный» импульс с выбросами в моменты фронтов входного импульса).

Запишите в протокол значение частоты и сохраните изображение осциллограммы.

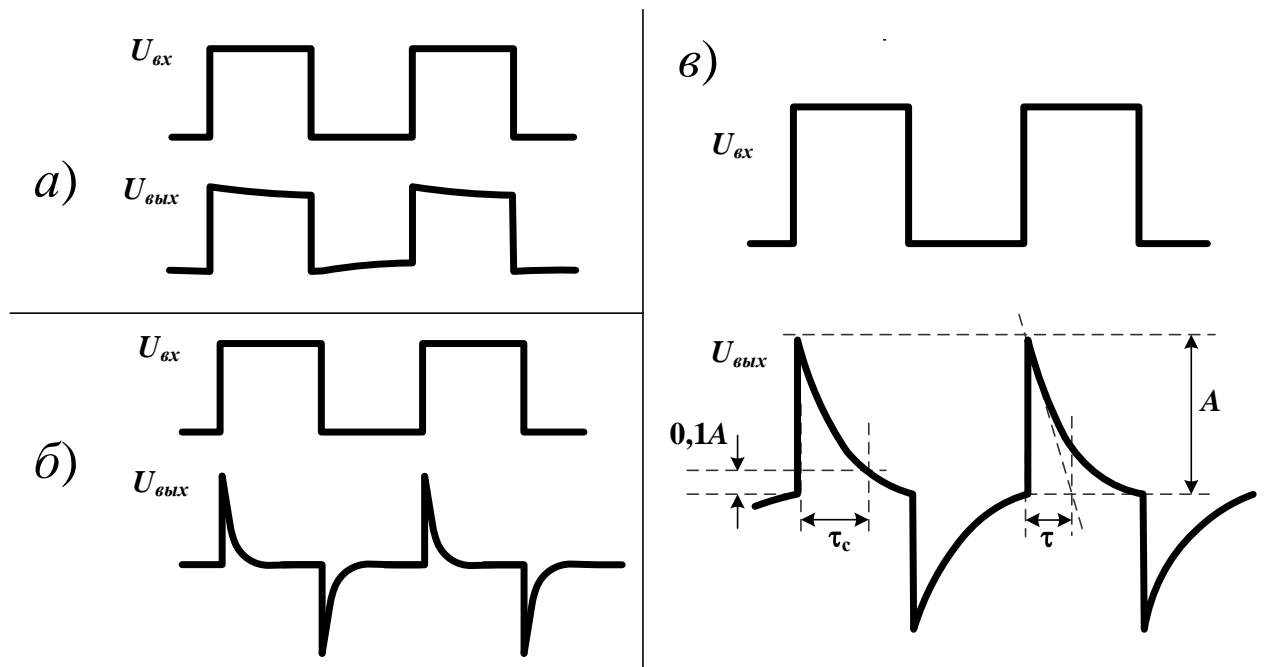


Рисунок 5. Вид импульсов на входе и выходе  $RC$ -фильтра верхних частот при разных соотношениях частоты следования импульсов и частоты среза фильтра.

### в) Оценка времени нарастания импульса.

Выберите частоту  $f_3$ , при которой выходной импульс имеет вид, показанный на рисунке 5, в (спад после момента фронта входного импульса примерно равен длительности входного импульса). Запишите в протокол значение частоты.

Подберите удобный масштаб по вертикали на осциллограмме и подберите амплитуду сигнала генератора таким образом, чтобы амплитуда выходных импульсов соответствовала 10 делениям в поле осциллограммы. Используя курсоры, измерьте длительность спада  $\tau_c$ , как показано на рисунке 5, в (сохраните изображение осциллограммы с установленными курсорами). Запишите полученный результат в протокол.

г) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА. Оценка постоянной времени цепи по форме выходного импульса.

Используя сохраненные осциллограммы, по виду выходного сигнала оцените постоянную времени  $\tau$  (как показано на рисунке 5, в).

д) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА. Сравните значения частот  $f_1$  и  $f_2$  с частотой среза  $RC$ -фильтра, найденной при выполнении п. 1.

е) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА. Сравните измеренную длительность спада  $\tau_c$  и постоянную времени цепи с рассчитанными по значениям элементов цепи (теоретическое соотношение  $\tau_c = 2,3 \cdot \tau = 2,3 \cdot R \cdot C$ ).

### **Часть 3. Измерение АЧХ и ФЧХ $RC$ -цепей с использованием «Bode»-анализатора**

#### **3.1 Включение и настройка «Bode»-анализатора**

а) Включение приборов.

Не меняя собранную схему, закройте программы функционального генератора и осциллографа и запустите программу анализатора «Bode» (Bode-analyzer).

#### **ПОЯСНЕНИЕ**

Анализатор «Bode» предназначен для автоматического измерения и отображения АЧХ и ФЧХ цепи в заданном диапазоне частот и с заданным шагом изменения частоты между точками на отображаемых зависимостях. При этом, для подачи сигнала на вход тестируемой цепи анализатор предполагает использование выхода «FGEN» на макетной плате (гнездо 33), к которому должна быть подсоединена тестируемая цепь. Для анализа сигнала на входе и выходе тестируемой цепи анализатор может использовать BNC входы осциллографа. Для возможности работы программы анализатора «Bode» программы функционального генератора и осциллографа должны быть закрыты.

б) Настройка анализатора

Установите на панели анализатора: входной и выходной сигналы на входах CH0 и CH1, диапазон частот от 100 Гц до 100 кГц (Measurement Settings: Start Frequency = 100 Hz; Stop Frequency = 100k Hz), шаг 20 точек на декаду<sup>1)</sup> (Measurement Settings: Step = 20 per decade).

Установите полулогарифмический масштаб (линейный масштаб по вертикальной оси) и автоматическое масштабирование (Graph Settings: Mapping → Lin, и выбор “Autoscale”).

#### **3.1. Измерение АЧХ и ФЧХ дифференцирующей $RC$ -цепи (ФВЧ)**

а) Предварительное измерение АЧХ и ФЧХ.

Запустите анализатор и получите на графиках АЧХ и ФЧХ  $RC$ -цепи. Сохраните полученные АЧХ и ФЧХ в файлах с изображением и с данными<sup>2)</sup>.

<sup>1)</sup> Декада – диапазон изменения частоты в 10 раз.

<sup>2)</sup> Для сохранения данных нужно остановить работу прибора и нажать на иконку «Log» в нижней правой части окна программы прибора.

С помощью курсора найдите частоту, на которой значение  $K$  наиболее близко к значению 0,707 (значения коэффициента передачи, обозначенного «Gain», и фазы  $\varphi$  отображаются под полем ФЧХ). Запишите в протокол значения этой частоты.

**б) Подробное измерение области среза.**

Измените диапазон измерения анализатора до одной декады так, чтобы значения частоты среза (приближенное значение было найдено в предыдущем пункте измерений) находилось примерно в середине этой декады (с учетом логарифмического масштаба по частоте), и установите шаг изменения частоты 100 точек на декаду.

Запустив анализатор, проведите измерение АЧХ и ФЧХ. С помощью курсора найдите частоту среза  $f_c$ , на которой значение  $K$  наиболее близко к уровню 0,707 и запишите в протокол значения этой частоты и значение  $K$  и  $\varphi$  для этой частоты. Сохраните изображение графиков и измеренные данные.

### **3.2. Измерение АЧХ и ФЧХ RC-ФВЧ (интегрирующая RC-цепь)**

**а) Сборка схемы для измерений.**

Соберите на монтажной плате схему с интегрирующей RC-цепью (ФНЧ), показанную на рисунке 2 (для этого можно поменять местами резистор и конденсатор). Установите на панели Vode-анализатора диапазон частот от 100 Гц до 100 кГц, шаг 20 точек на декаду.

**б) Измерения АЧХ и ФЧХ цепи.**

Проведите для данной схемы все измерения, которые были указаны в п.3.1.

**в) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** Используя сохраненные данные, постройте (настоятельно рекомендуется использовать пакет "Excel") в полулогарифмическом масштабе графики, содержащие измеренные точки АЧХ цепей (две АЧХ на одном графике) и ФЧХ цепей (две ФЧХ на одном графике). На этих же графиках постройте теоретические кривые АЧХ и ФЧХ RC-цепей для частоты среза, оцененной по значениям сопротивления и емкости элементов, измеренным в п. 1.1, в. При этом можно использовать формулы, приведенные в пояснении в п. 1.2.

На этих же графиках отобразите точки, соответствующие измерениям коэффициента передачи и фазового сдвига интегрирующей RC-цепи, сделанным при выполнении п. 1.2, в, г.

**г) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** Сравните вид измеренных кривых с теоретическими зависимостями. Сравните значение частоты среза, соответствующее спаду измеренных анализатором АЧХ до уровня 0,707 (частоту среза следует отметить на графиках), с частотой среза, рассчитанной и измеренной при выполнении п. 1 работы. Сравните значение измеренного анализатором сдвига фаз на частоте среза с теоретическим значением  $\varphi(f_c)$  для RC-цепи.

## **Часть 4. Исследование частотных свойств колебательного контура**

### **4.1. Измерение параметров катушки индуктивности и оценка параметров LC-контура.**

а) Запишите в протокол номинальное значение индуктивности, указанное на катушке индуктивности (если на элементе нет обозначений, узнайте номинал у преподавателя).

б) Измерение индуктивности.

Запустите программу мультиметра и проведите измерение фактических значений сопротивления  $r$  и индуктивности  $L$  катушки. Подключение катушки для измерения ее сопротивления проводить также как было в случае резистора при выполнении п.1.1. При измерении индуктивности подключать катушку к гнездам монтажной платы «DUT+» (гнезда 29) и «DUT-» (гнезда 30) на колодках в левой части макетной платы. Запишите полученные результаты в протокол.

в) Оценка параметров LC-контуров.

Рассчитайте резонансную частоту  $f_p$ , эквивалентное сопротивление  $R_s$  и собственную добротность LC-контура  $Q$ . Покажите полученные результаты преподавателю.

г) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА. Сравните измеренное значение индуктивности дросселя с номинальным, указанным на корпусе дросселя, а также рассчитанное значение  $f_p$ , с оценкой, которую можно было сделать по номинальным значениям индуктивности и емкости.

### **ПОЯСНЕНИЕ**

Катушка индуктивности, используемая в работе может быть представлена эквивалентной схемой в виде последовательного соединения сопротивления  $r$  (сопротивление провода катушки) и индуктивности  $L$ . С учетом этого, колебательный LC-контур на основе конденсатора и дросселя характеризуется рядом приведенных ниже параметров.

Резонансная частота (зависит только от  $L$  и  $C$ ) –  $f_p = 1/[2\pi(LC)^{1/2}]$  которая с высокой точностью соответствует экстремумам АЧХ цепей с LC-контуром.

Эквивалентное сопротивление  $R_s = L/rC$  – вещественное сопротивление, которому равно сопротивление параллельного LC-контура на резонансной частоте (сопротивление последовательного LC-контура на резонансной частоте равно  $r$ ).

Собственная добротность LC-контура  $Q = (L/C)^{1/2}/r$  (величину  $\rho = (L/C)^{1/2}$  называют волновым или характеристическим сопротивлением контура).

Пример узкополосных фильтрующих цепей (коэффициент передачи по напряжению имеет максимум в относительно узкой области частот, и резко снижается при удалении от этой области) на основе параллельного и последовательного LC-контура, а также характерный вид АЧХ и ФЧХ для таких цепей показан на рисунке 6.

АЧХ фильтрующей цепи характеризуется резонансной частотой  $f_p$  и полосой пропускания по уровню спада 3 дБ  $\Delta f = f_v - f_n$ , где  $f_v$  и  $f_n$  – верхняя и нижняя границы полосы пропускания для которых  $K(f_v) = K(f_n) = 0,707 K(f_p)$ . Добротность фильтрующей цепи характеризуется отношением  $Q' = f_p/\Delta f$ .

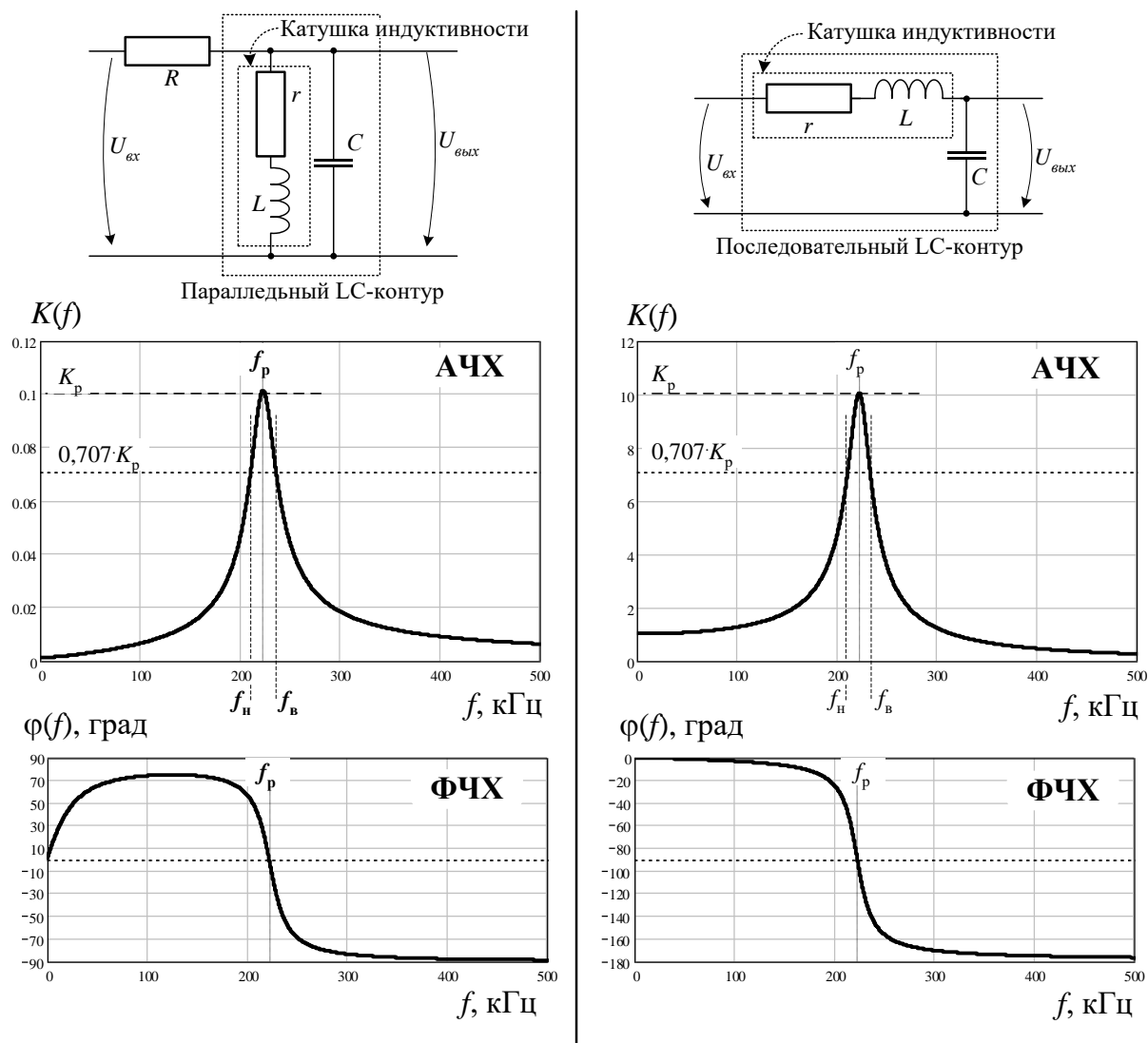


Рисунок 6. Цепи на основе параллельного (слева) и последовательного (справа)  $LC$ -контура, и примеры АЧХ и ФЧХ для этих цепей.

## 4.2. Измерение амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик параллельного $LC$ -контура

### а) Сборка схемы для измерений.

Соберите на монтажной плате схему с параллельным  $LC$ -контуром, показанную на рисунке 7, подключив контур к выходу функционального генератора и входам осциллографа для измерения АЧХ и ФЧХ контура с применением Bode-анализатора. Покажите собранную схему преподавателю. Для соединения источника, измерительных цепей анализатора и тестируемой  $RLC$ -цепи общим проводом, необходимо соединить проводником соответствующую точку тестируемой цепи с гнездом общей точки «GROUND» на макетной плате (при этом генератор и измерительные цепи подсоединены к общей точке внутри платформы ELVIS II).

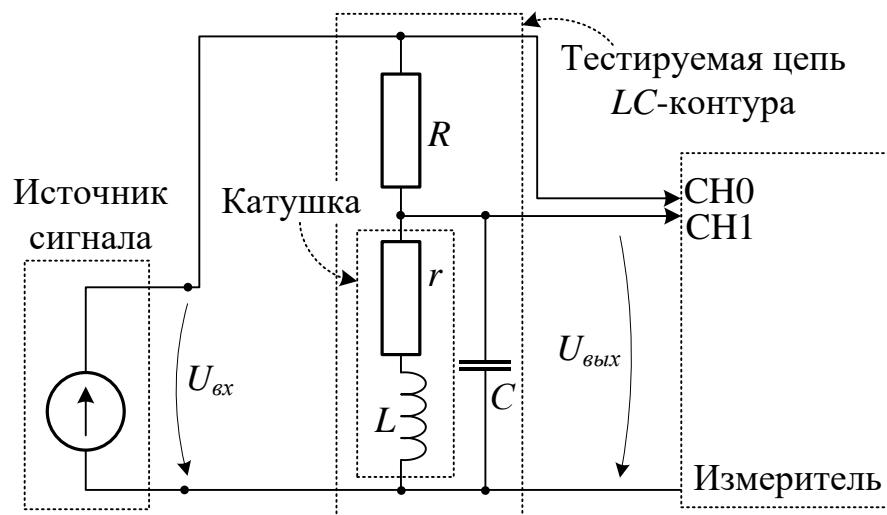


Рисунок 7. Схема узкополосного фильтра основе параллельного  $LC$ -контура с подключенными приборами

#### б) Настройка приборов.

Установите на панели анализатора «Vode»: входной и выходной сигналы на входах CH0 и CH1, диапазон частот от 1 до 200 кГц, шаг изменения частоты 20 точек на декаду, полулогарифмический масштаб (по вертикальной оси – линейный масштаб) и автоматическое масштабирование (“Autoscale”).

#### в) Предварительное измерение АЧХ и ФЧХ контура.

Запустите анализатор и получите на графиках АЧХ и ФЧХ  $LC$ -контура. Убедитесь в том, что форма АЧХ имеет вид резонансной зависимости с максимумом в области рассчитанного при выполнении п. 4.1 значения  $f_p$ .

С помощью перемещения курсора, найдите точку с максимальным коэффициентом передачи  $K$  (gain) и определите соответствующую ей частоту (близкую к резонансной частоте).

#### г) Измерение АЧХ и ФЧХ в области резонанса.

Измените диапазон измерения анализатора так, чтобы найденный резонансный максимум находился примерно в середине диапазона, а на границы диапазона соответствовали спаду коэффициента передачи до уровня примерно 0,1 от максимального. Установите шаг измерения 100 точек на декаду.

Запустив анализатор, проведите измерение АЧХ и ФЧХ.

С помощью курсоров найдите и запишите в протокол точные значения резонансной частоты  $f_p$  и значение  $K_p = K(f_p)$  и  $\varphi_p = \varphi(f_p)$ , а также значения нижней и верхней граничных частот резонансной кривой  $f_n$  и  $f_v$ , по уровню спада АЧХ 3 дБ, т.е. для которых  $K(f_n) = K(f_v) = 0.707 \cdot K_p$ . При необходимости, для более точного определения необходимых точек, уменьшите шаг изменения частоты до 200 – 500 точек на декаду.

Убедитесь в соответствии характера измеренных АЧХ и ФЧХ с теоретическими зависимостями  $K(f)$  и  $\varphi(f)$  для исследуемого  $LC$ -контура. Сохраните изображение полученных АЧХ и ФЧХ, а также файл с данными их измерения.

#### д) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА. Сравните значение измеренной резонансной частоты с частотой, рассчитанной и измеренной при выполнении п. 4.1 данной работы. Сравните значение сдвига фаз на частоте среза с теоретическим значением для $RC$ -цепи.

**ж) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** На основе измеренных параметров резонансной АЧХ, рассчитайте значения полосы пропускания  $\Delta f$  и добротности контура  $Q'$  и сравните полученное значение  $Q'$  со значением, рассчитанным через параметры элементов цепи по теоретической формуле  $Q' = Q/(1 + R_s/R)$ .

**з) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** Сравните измеренное фактическое значение  $K_p$  с результатом расчета по теоретической формуле  $K_p = 1/(1 + R/R_s)$ . Поясните, почему, несмотря на резонанс коэффициента передачи на частоте  $f_p$ , значение коэффициента передачи  $K_p$  остается существенно меньше единицы.

#### 4.3. Измерение АЧХ и ФЧХ последовательного LC-контура

**а) Сборка схемы для измерений.**

Измените тестируемую цепь на монтажной плате схемой с последовательным LC-контуром, как показано на рисунке 8, подключив последовательный контур к выходу функционального генератора и входам осциллографа для измерения АЧХ и ФЧХ контура с применением Vode-анализатора. Покажите собранную схему преподавателю.

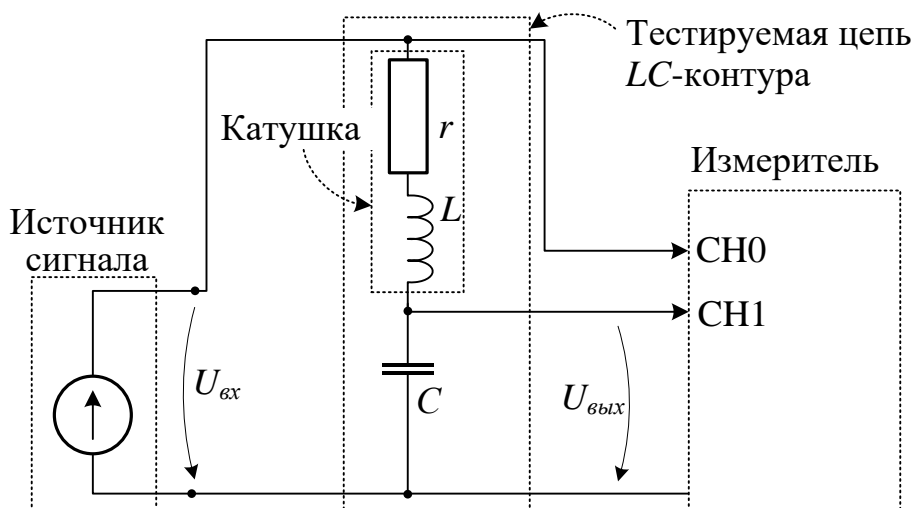


Рисунок 8. Схема узкополосного фильтра основе последовательного LC-контура с подключенными приборами

**б) Измерение АЧХ и ФЧХ последовательного LC-контура.**

Проведите для данной схемы все те же измерения, которые были сделаны при выполнении п. 4.2 (подпункты «б») – «г»)).

**в) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** Сравните значение измеренной резонансной частоты с частотой, рассчитанной и измеренной при выполнении п. 4.1 данной работы. Сравните значение измеренной резонансной частоты, а также частот кривой  $f_n$  и  $f_v$  с аналогичными параметрами, измеренными при выполнении п. 4.2 данной работы. Сравните значение сдвига фаз на частоте среза с теоретическим значением для RC-цепи.

**г) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА.** На основе измеренных параметров резонансной АЧХ, рассчитайте значения полосы пропускания  $\Delta f$  и



добротности контура  $Q'$  и сравните полученное значение  $Q'$  со значением, теоретическому соотношению  $Q' = Q$ , для цепи с последовательным  $LC$ -контуром.

д) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА. Сравните измеренное фактическое значение  $K_p$  с результатом теоретического соотношения для рассматриваемой цепи  $K_p = Q$ . Поясните, почему для пассивной электрической цепи в области частоты  $f_p$  значение коэффициента передачи  $K_p$  оказывается существенно больше единицы.

е) ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА. По сохраненным данным Bode-анализатора постройте на одном графике АЧХ, нормированные на  $K_p$  для последовательного и параллельного  $LC$ -контуров в зависимости от обобщенной расстройки  $\xi$ . Аналогичный график постройте для ФЧХ контуров. Графики построить в линейном масштабе, и сравнить их вид с теоретическими зависимостями.

### ПОЯСНЕНИЕ

Обобщенная расстройка определяется выражением  $\xi = Q' \cdot [(f/f_p) - (f_p/f)]$ .

Теоретическая зависимости нормированной АЧХ  $LC$ -контура в зависимости от обобщенной расстройки имеет вид

$$K(\xi) = 1/(1+\xi^2)^{1/2}.$$

ФЧХ контура определяется выражениями:

$\varphi(\xi) = -\arctg(\xi)$	– параллельный контур;
$\varphi(\xi) = -\arctg(\xi) - \pi/2$	– последовательный контур.

### Завершение работы

На этом задания лабораторной работы закончены.

Закройте программу Bode-анализатора, закройте другие программы, если они были запущены, выключите питание макетной платы и платформы ELVIS II, перенесите на свой USB-накопитель результаты работы и извлеките его из разъема компьютера.

Запустите режим завершения работы компьютера. Не препятствуйте, если при этом компьютер будет устанавливать обновления, и предупредите об этом преподавателя.

После завершения работы компьютера отключите питание установки выключателем, расположенном на сетевом фильтре, к которому подключено рабочее место.

Сдать комплекты элементов и соединительные провода преподавателю.

## УКАЗАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ ОТЧЕТА

---

1) Отчет по лабораторной работе должен быть выполнен в типовой форме, иметь титульный лист (с указанием наименования университета и кафедры, названия отчета, ФИО и № группы выполнявших работу студентов, ФИО преподавателя, год) и содержать:

- краткое введение с указанием тематики работы, целей и объектов экспериментального изучения;
- схемы соединения элементов и подключения приборов, режимы работы;
- результаты измерений и расчетов;
- анализ полученных результатов;
- заключение.

Требования по обработке результатов измерений предполагают, что студенты имеют возможность использовать для подготовки отчета компьютер, и владеют начальными навыками работы с ним. Окончательно оформить отчет так же целесообразно посредством компьютера, но сдавать его необходимо распечатанным на бумажном носителе. В случае возникновения трудностей с отображением необходимых знаков, формул, схем и т.п. допускается вписывать требуемые части вручную и рисовать необходимые схемы вручную. Не допускается сдавать отчет с некорректным отображением материала (формул, графиков и т.п.), ссылаясь на неумение или ограниченные возможности используемых программ. Предпочтительным является подготовка требуемого материала распространенными программными средствами, например, MS Word и MS Excel.

В качестве исходных данных, на основе которых можно выбрать необходимые для обработки и анализа результатов формулы, параметры и т. п., можно использовать материалы методических указаний к работе, а также материалы соответствующих лекционных курсов и литературы по теме работы. В последних случаях следует указывать источник информации.

2) Основную содержательную часть отчета (основные разделы, за исключением введения и заключения) следует излагать в том же порядке, как описаны задания в программе работы с учетом пунктов, которые указаны для выполнения при подготовке отчета. При этом желательно сохранить основную нумерацию заданий, при необходимости можно дополнительно нумеровать подпункты.

При изложении результатов по каждому разделу программы работы (разделы пронумерованы двойной нумерацией) следует:

- Кратко и ясно изложить, что было сделано в ходе работы, привести необходимые схемы измерений. При этом не надо копировать пункты заданий из программы работы, описывать, как проводились соединения в схеме, как устанавливались режимы и опции в программах приборов. Надо кратко своими словами пояснить какие сигналы или зависимости наблюдались и посредством каких приборов какие величины измерялись.

– В наглядной и понятной форме привести результаты экспериментов, указав непосредственно измеренные и вычисленные значения. Привести графики требуемых зависимостей, и сохраненных изображений панелей осциллографа, Вode-анализатора и других приборов, отображающих необходимые зависимости или иллюстрирующие выполнение заданий работы. При оформлении графиков и сохраненных изображений лицевых панелей приборов учитывать, будет отчет распечатываться в цветном или в черно-белом формате.

– Провести краткий анализ полученных результатов измерений, сделав выводы о характере наблюдаемых зависимостей, сравнив значение полученных при измерениях, пересчитанных или теоретически известных величин друг с другом.

При построении графиков зависимостей следует четко соблюдать все стандартные требования. Должны быть четко понятны величины, значения которых отложены по осям графика, единицы измерения, соблюдены рекомендации по масштабам (линейный, логарифмический, полулогарифмический) и разумно выбраны приведенные на графике диапазоны изменений отображаемых величин.

При сравнении значений величин должна быть обязательно указана величина относительного расхождения в процентах, должна быть охарактеризована степень отличия (например, значения «хорошо сходятся», «примерно соответствуют», «сходятся по порядку величины», «значительно отличаются» и т. п., в зависимости от ситуации), при существенных расхождениях должны быть сделаны выводы о возможных причинах такого различия.

3) В заключении к отчету следует привести общие выводы, в которых:

- указать полноту выполнения частей и разделов программы работы (если работа выполнена не в полном объеме, надо указать причины);
- на основании анализа результатов измерений, приведенного в основной содержательной части отчета кратко охарактеризовать успешность выполнения работы или различных ее частей;
- при необходимости отметить какие-либо особенности, впечатления, пожелания, связанные с выполнением тех или иных частей или разделов лабораторной работы.