

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 20.01.2021 15:07:07  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра вычислительной техники



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

*Октябрь* 2016 г.

## ПРОХОЖДЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

Методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов  
направления подготовки 09.03.01 по дисциплине  
"Основы теории цепей и сигналов»

Курск 2016

УДК 621.396.4

Составитель: В.И. Иванов

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Пиккиев В.А.*

**Прохождение импульсных сигналов через частотно-избирательные цепи:** методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Основы теории цепей и сигналов» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. В.И. Иванов. - Курск: ЮЗГУ, 2016. - 15 с.: ил. 11, табл. 1. -Библиогр.: с. 15.

Описывается методика исследования искажений прямоугольных видео- и радиоимпульсов при прохождении через частотно-избирательные цепи; приведены рекомендации по применению программы моделирования электронных схем для изучения процессов в частотно-избирательных цепях.

Методические указания соответствуют Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования направления подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, учебному плану направления подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, одобренному Ученым советом университета (протокол № 7 «29» февраля 2016 г.).

Предназначены для студентов направления подготовки 09.03.01 очной и заочной формы обучения

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *12.10.16* . Формат 60\*84 1/16.  
Усл. печ.л. *0,7* . Уч.-изд.л. *0,6* Тираж 100 экз. Заказ *960*  
Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет  
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.



# ПРОХОЖДЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

## 1. Цель работы

Исследование характеристик частотно-избирательных цепей и искажений, возникающих при прохождении через них импульсных сигналов: видеоимпульсов через фильтр нижних частот и радиоимпульсов с прямоугольной огибающей через полосовой фильтр.

## 2. Основные теоретические положения и расчетные формулы

Для нахождения сигнала  $s_{\text{вых}}(t)$  на выходе линейной цепи при подаче на ее вход сигнала  $s_{\text{вх}}(t)$  необходимо иметь математическую модель этой цепи. В частотной области цепь характеризуется комплексным коэффициентом передачи  $K(j\omega)$ , который можно использовать для определения спектральной функции  $S_{\text{вых}}(j\omega)$  выходного сигнала. Во временной области цепь определяется импульсной характеристикой  $h(t)$  – реакцией на  $\delta$ -импульс или переходной характеристикой  $g(t)$  – реакцией на единичный скачок  $\sigma(t)$ . Эти модели однозначно взаимосвязаны. Функция  $h(t)$  является универсальной, но при анализе прохождения через цепь прямоугольных импульсов более удобно использовать переходную характеристику  $g(t)$ .

**Фильтры нижних частот (ФНЧ).** Основное назначение ФНЧ – с минимальным ослаблением передавать на выход колебания, частоты которых не превосходят заданной граничной частоты, называемой *частотой среза* фильтра  $\omega_0$ . В то же время колебания с более высокими частотами должны существенно ослабляться. Очевидно, идеальная частотная зависимость модуля коэффициента передачи ФНЧ имеет вид

$$K(\omega) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \omega \leq \omega_0, \\ 0, & \omega > \omega_0. \end{cases}$$

Такая частотная характеристика заведомо нереализуема: обращение в нуль функции  $K(\omega)$  противоречит известному критерию Пэли – Винера [1]. Возникает задача подбора допустимой аппроксимирующей функции.

**Максимально-плоская аппроксимация.** Один из возможных способов аппроксимации идеальной характеристики ФНЧ построен на использовании коэффициента передачи вида

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}}}. \quad (1)$$

ФНЧ, имеющий такие частотные свойства, называют фильтром с

*максимально-плоской характеристикой*, или фильтром *Баттлерворта*. Целое число  $n = 1, 2, 3, \dots$  является *порядком* фильтра. При любом  $n$  такой фильтр реализуем.

В полосе пропускания фильтра, т.е. при  $0 \leq \omega \leq \omega_0$  модуль коэффициента передачи с ростом частоты плавно уменьшается. На частоте среза (при  $\omega = \omega_0$ ) ослабление, вносимое фильтром, независимо от порядка системы составляет  $\sqrt{2}$  раз, что в логарифмическом масштабе соответствует уровню – 3 дБ. Чем больше  $n$ , тем точнее аппроксимируется идеальная форма частотной характеристики.

На рис. 1 показаны амплитудно-частотные характеристики ФНЧ 1-го, 2-го и 3-го порядков. Порядок фильтра выбирают, исходя из требований, предъявляемых к ослаблению сигналов с частотами  $\omega > \omega_0$ .

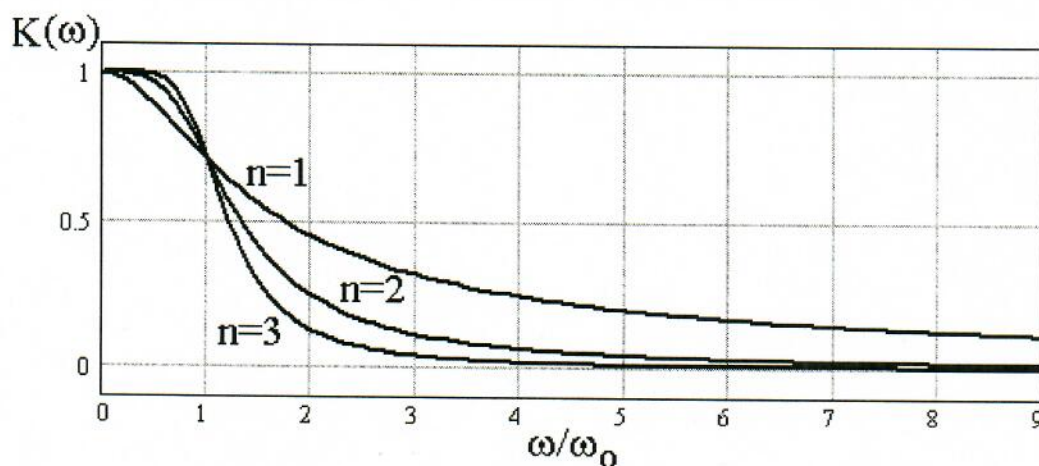


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики ФНЧ

Примерами схем ФНЧ являются интегрирующие RC-цепь (фильтр 1-го порядка) и LRC-цепь (фильтр 2-го порядка), приведенные на рис. 2.

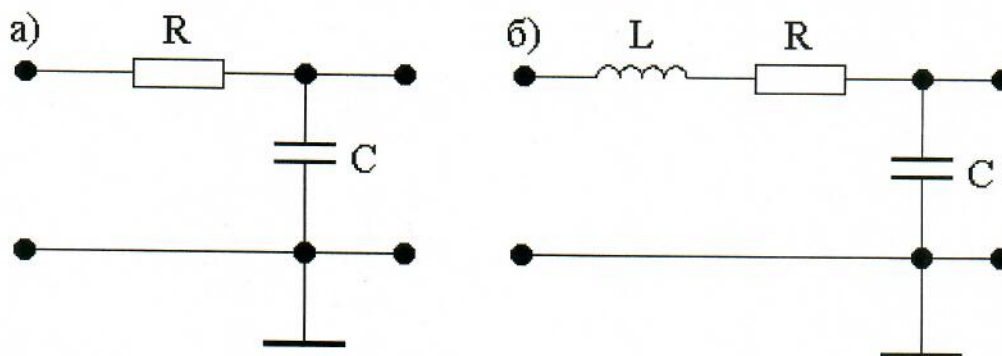


Рис. 2. Схемы ФНЧ: *а* – 1-го порядка; *б* – 2-го порядка

Комплексный коэффициент передачи RC-цепи имеет вид

$$K(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}. \quad (2)$$



Частота среза  $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ .

Переходная характеристика этой цепи имеет форму экспоненты:

$$g(t) = 1 - e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (3)$$

Комплексный коэффициент передачи LRC-цепи в общем случае выражается формулой

$$K(j\omega) = \frac{1}{(j\omega)^2 LC + j\omega RC + 1}. \quad (4)$$

Введем обозначения:

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – частота среза;

$\sqrt{\frac{L}{C}} = \rho$  – характеристическое сопротивление цепи;

$\frac{\rho}{R} = Q$  – добротность цепи.

Выражение (3) будет соответствовать ФНЧ 2-го порядка с максимально-плоской характеристикой только при  $Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$ :

$$K(j\omega) = \frac{1}{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 + \sqrt{2} \frac{j\omega}{\omega_0} + 1}. \quad (5)$$

Переходная характеристика ФНЧ 2-го порядка имеет вид

$$g(t) = 1 - e^{-\frac{\omega_0 t}{\sqrt{2}}} \cdot \cos \frac{\omega_0 t}{\sqrt{2}}. \quad (6)$$

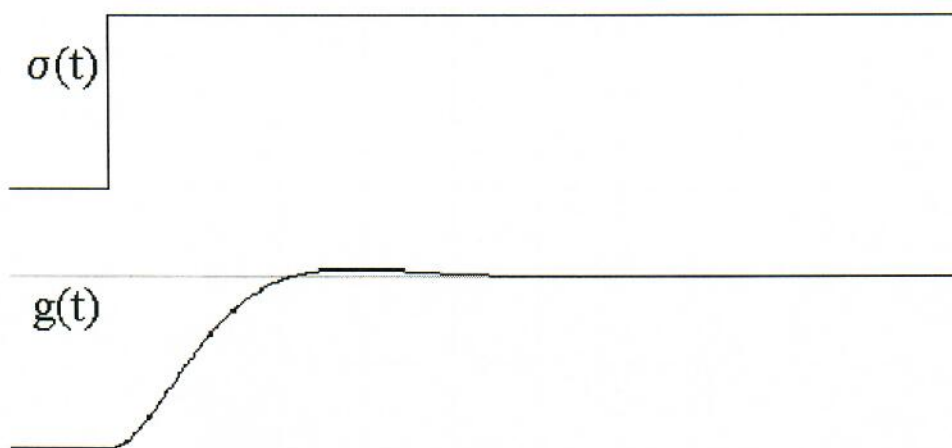


Рис. 3. Переходная характеристика ФНЧ 2-го порядка

На рис. 3 показан график характеристики (6). Время установления выходного напряжения от нуля до максимума зависит от полосы пропускания фильтра. Оно составляет

$$t_{\text{уст}} = \frac{\sqrt{2}\pi}{\omega_0} = \frac{1}{\sqrt{2}f_0}. \quad (7)$$

Следовательно, через такой фильтр пройдут без потери амплитуды прямоугольные импульсы длительностью  $t_{\text{и}}$  не менее  $t_{\text{уст}}$ . Другими словами, частота среза ФНЧ выбирается из условия

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{2}t_{\text{и}}} = \frac{0,707}{t_{\text{и}}}. \quad (8)$$

Если на вход ФНЧ подать смесь полезного сигнала в виде прямоугольного видеоимпульса и высокочастотной помехи, спектр которой находится за пределами полосы пропускания фильтра, на выход пройдет с некоторыми допустимыми искажениями полезный сигнал и будет существенно подавлена помеха, как показано на рис. 4.

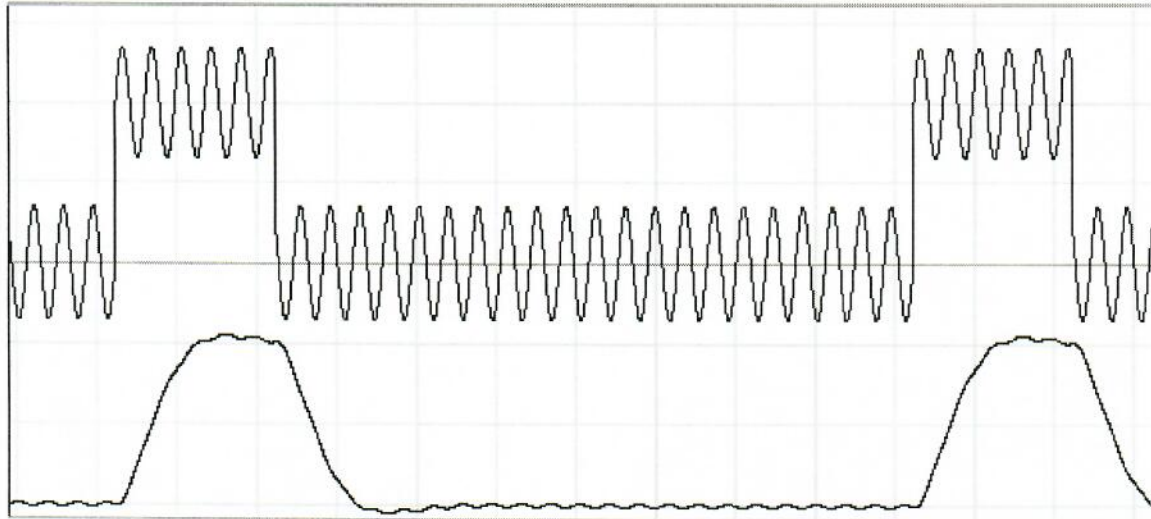


Рис. 4. Диаграммы смеси сигнала и помехи на входе и выходе ФНЧ

**Полосовые фильтры (ПФ).** Основное назначение ПФ – передавать на выход колебания, частоты которых лежат в пределах полосы частот  $\Delta\omega$  в окрестности центральной частоты  $\omega_0$ , и ослаблять сигналы за пределами полосы пропускания.

Простейшим полосовым фильтром является последовательный колебательный LC контур (рис. 5).

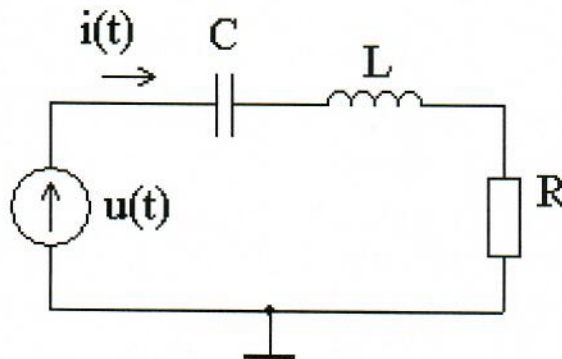


Рис. 5. Последовательный колебательный LC контур

Комплексный коэффициент передачи LC контура выражается формулой

$$K(j\omega) = \frac{1}{1 + j \frac{2Q}{\omega_p} (\omega - \omega_p)} \quad (9)$$

АЧХ последовательного LC контура показана на рис. 6.



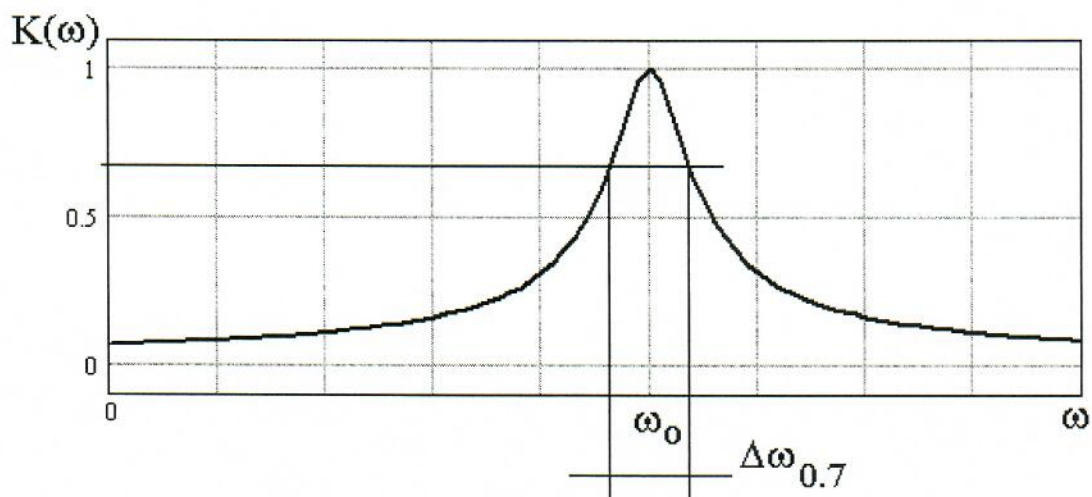


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра

Избирательные свойства контура определяются резонансной частотой  $\omega_p$  и добротностью  $Q$ . Эти параметры контура зависят от компонентов цепи:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad Q = \frac{\rho}{R}, \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Полоса пропускания  $\Delta\omega_{0,7}$  на уровне 0,7, или  $-3$  дБ, относительно максимума амплитудно-частотной характеристики равна  $\Delta\omega_{0,7} = \frac{\omega_p}{Q}$ , или

$$\Delta f_{0,7} = \frac{f_p}{Q}. \quad (10)$$

Для нахождения отклика последовательного LC контура на поданный на его вход радиоимпульс напряжения с прямоугольной огибающей и немодулированным заполнением

$$u(t) = U_m \cos \omega_0 t, \quad 0 < t < t_u,$$

где  $t_u$  – длительность импульса, необходимо рассмотреть процессы на фронте (при включении гармонической э.д.с.) и срезе импульса (при выключении её) при точной настройке контура на несущую частоту ( $\omega_p = \omega_0$ ).

При включении гармонической э.д.с. колебания тока в колебательном LC контуре нарастают по экспоненциальному закону:

$$i(t) = \frac{U_m}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}}) \cdot \cos \omega_0 t,$$

где

$$\tau_k = \frac{2L}{R} = \frac{2Q}{\omega_p} = \frac{2}{\Delta\omega_{0,7}} \quad (11)$$

– постоянная времени контура;



Время нарастания  $t_n$  амплитуды тока от 0 до  $0.95 \frac{U_m}{R}$  определяется из условия:

$$1 - e^{-\frac{t_n}{\tau_k}} = 0.95$$

и равно

$$t_n = 3\tau_k = \frac{6Q}{\omega_p} = \frac{6Q}{2\pi f_p}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что переходный процесс в колебательном контуре (рис. 7) содержит примерно  $Q$  периодов  $T_p$  колебаний на резонансной частоте контура. Чем выше добротность цепи, тем продолжительнее этот процесс.

После прекращения действия внешней гармонической э.д.с. в контуре существуют экспоненциально убывающие свободные колебания тока. Длительность этого процесса определяется также выражением (12).

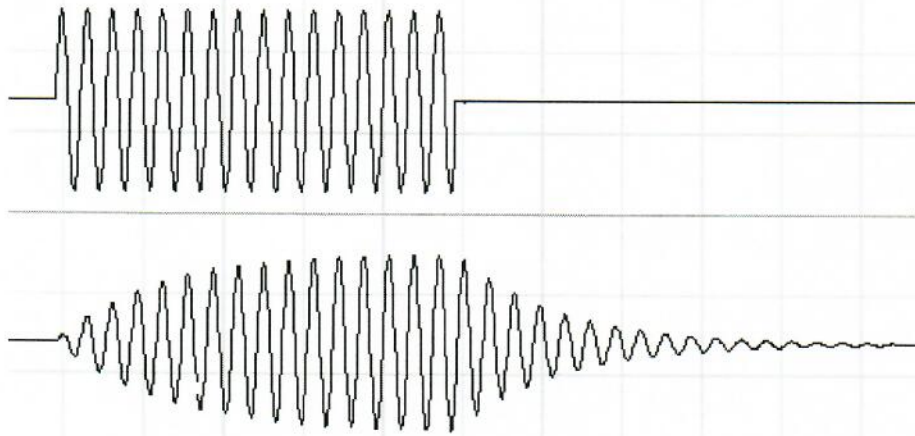


Рис. 7. Диаграммы радиоимпульса на входе и выходе ПФ

Очевидно, что через этот фильтр пройдут без потери амплитуды прямоугольные импульсы длительностью  $t_{и}$  не менее  $t_n$ . Следовательно,

полоса пропускания ПФ выбирается из условия  $\Delta\omega_{0.7} = \frac{6}{t_{и}}$ , или

$$\Delta f_{0.7} = \frac{1}{t_{и}}, \quad (13)$$

откуда требуемая добротность контура равна

$$Q = \frac{f_p}{\Delta f_{0.7}} = f_p t_{и}. \quad (14)$$

### 3. Программа исследований и порядок работы

#### 3.1. Исследование фильтра нижних частот

## Варианты заданий

Вариант	Частота среза $f_0$ , кГц	Длит-сть импульса $t_{и}$ , мкс	R, Ом	Вариант	Частота среза $f_0$ , кГц	Длит-сть импульса $t_{и}$ , мкс	R, Ом
1	5		20	11	4		15
2		150	20	12		125	20
3	3		15	13	5		30
4		200	15	14		100	30
5	4		25	15	3,5		15
6		100	25	16		200	15
7	2		30	17	3		25
8		140	30	18		280	20
9	2,5		20	19	2		25
10		250	15	20		140	20

Собрать на рабочем столе программы схему для измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и полосы пропускания ФНЧ 2-го порядка на основе RLC-цепи (рис. 8).

Рассчитать частоту среза  $f_0$  фильтра или длительность импульса по формуле (8).

Вычислить параметры компонентов фильтра:

$$L = \frac{R}{2\sqrt{2}\pi f_0}; \quad C = \frac{1}{\sqrt{2}\pi f_0 R}.$$

Выразить индуктивность  $L$  в мГн, емкость  $C$  – в мкФ.

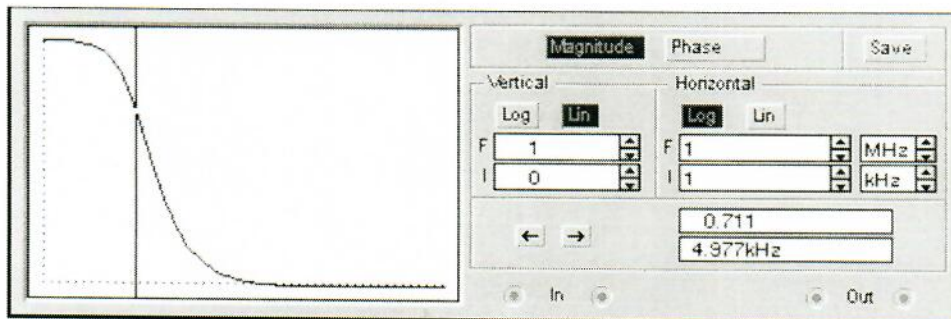
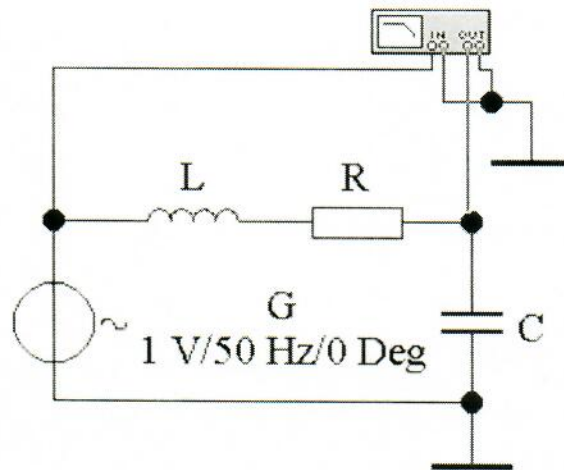


Рис. 8. Схема для измерения АЧХ и полосы пропускания ФНЧ

Построить на экране Bode Plotter в линейно-логарифмическом масштабе АЧХ фильтра и измерить частоту среза на уровне 0,707. Сопоставить результаты опыта с заданными и расчетными величинами

Собрать схему для исследования прохождения видеоимпульса через ФНЧ (рис. 9). Генератор G1 вырабатывает прямоугольные видеоимпульсы полезного сигнала, а генератор синусоидального напряжения G2 – высокочастотную помеху на частоте, например, в 10 раз выше частоты среза ФНЧ.



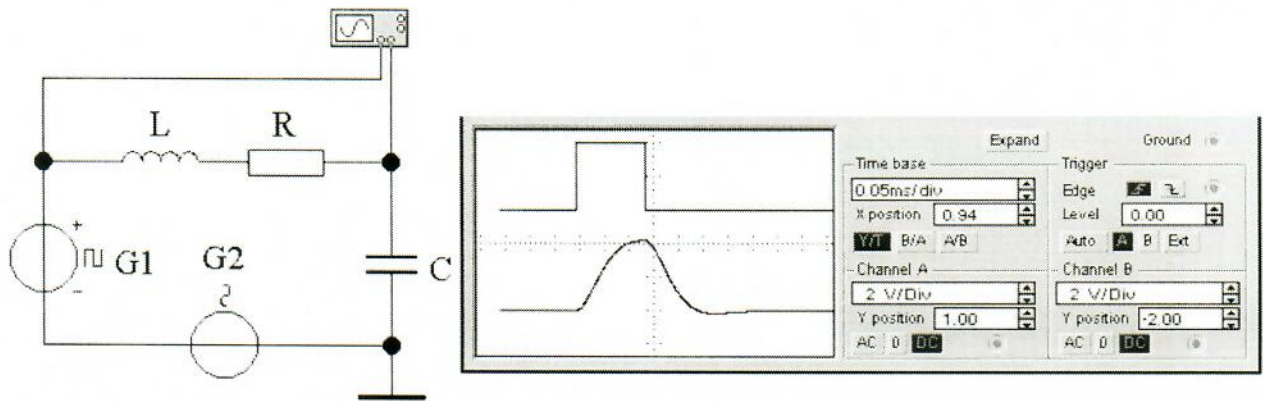


Рис. 9. Схема для исследования прохождения сигналов через ФНЧ

Установить напряжение помехи, равное нулю, а в генераторе G1 амплитуду импульсов 4 В, частоту 1000 Гц (период 1000 мкс) и с помощью опции **Duty cycle** – требуемую длительность импульса  $t_{и}$ . Получить на экране осциллографа диаграммы сигналов на входе и выходе фильтра.

Установить в генераторе G2 напряжение помехи, равное 1 В, и упомянутую выше частоту. В генераторе G1 оставить указанные выше установки. При этом на вход фильтра будет поступать сумма полезного импульсного сигнала и помехи. Получить на экране осциллографа изображения сигналов на входе и выходе фильтра.

### 3.2. Исследование полосового фильтра

Таблица 2

Варианты заданий

Вариант	$f_0$ , кГц	$\Delta f_{0,7}$ , кГц	$t_{и}$ , мкс	Q	R, Ом	Вариант	$f_0$ , кГц	$\Delta f_{0,7}$ , кГц	$t_{и}$ , мкс	Q	R, Ом
1	160	4			20	11	250		200		25
2	200		200		25	12	180			40	15
3	100			25	15	13	160	4			30
4	220	5,5			30	14	200		200		20
5	300		167		20	15	225			45	25
6	250			50	25	16	100	4			15
7	180	4,5			15	17	200		200		25
8	160		250		30	18	220			40	30
9	200			40	20	19	300	6			20
10	240	6			25	20	160		250		20

Собрать на рабочем столе программы схему для измерения амплитудно-

частотной характеристики (АЧХ) и полосы пропускания полосового фильтра на основе последовательного LC контура (рис. 10).

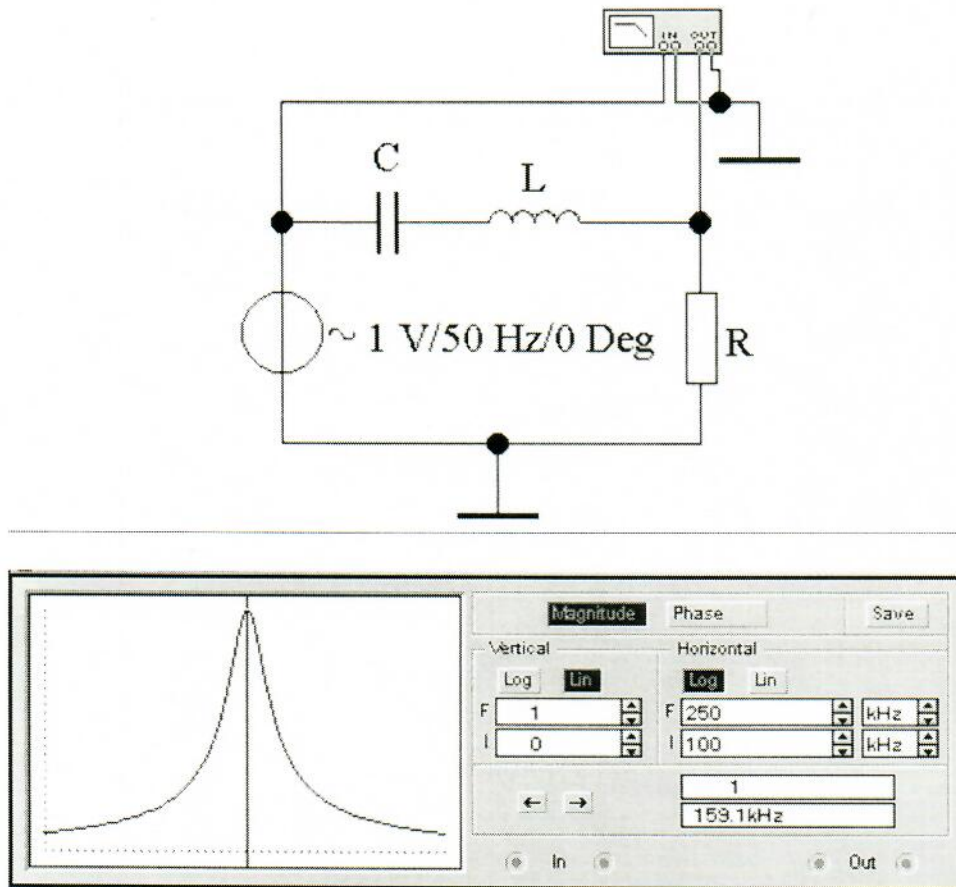


Рис. 10. Схема для исследования частотной характеристики последовательного LC контура

Установить параметры компонентов цепи согласно табл. 2. Рассчитать недостающие величины:

- полосу пропускания  $\Delta f_{0,7}$ , длительность импульса  $t_{\text{и}}$  и добротность фильтра  $Q$  с помощью формул (13) и (14);
- индуктивность и емкость – по формулам:

$$L = \frac{Q \cdot R}{2\pi f_0}; \quad C = \frac{1}{Q \cdot R \cdot 2\pi f_0}.$$

Выразить индуктивность  $L$  в мГн, емкость  $C$  – в нФ.

Построить на экране **Bode Plotter** в линейно-логарифмическом масштабе АЧХ фильтра и измерить резонансную частоту фильтра  $f_0$  и полосу пропускания  $\Delta f_{0,7}$  на уровне 0,707 относительно максимума АЧХ. Сопоставить результаты опыта с заданными и расчетными величинами.

Исследовать прохождение радиоимпульсов напряжения через полосовой фильтр. Собрать схему рис. 11.



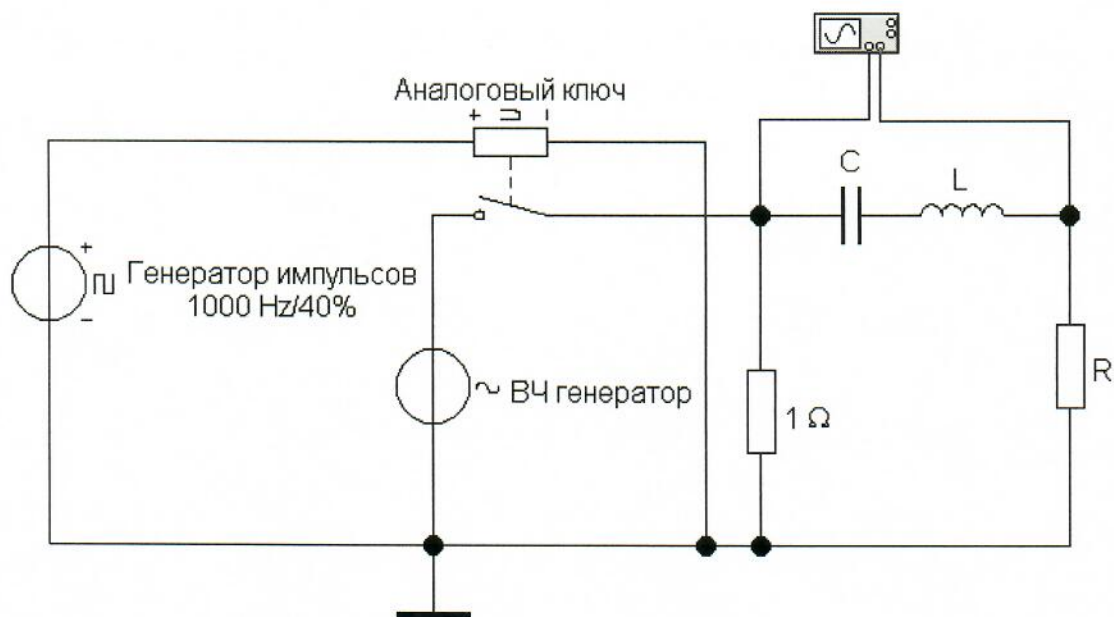


Рис. 11. Схема для исследовать прохождения радиоимпульсов напряжения через полосовой фильтр

Настроить частоту высокочастотного (ВЧ) генератора на резонансную частоту контура ( $f_0 = f_p$ ), задать напряжение 2 В. В свойствах аналогового ключа (**Voltage-Controlled Switch**) установить порог включения (**turn-on voltage**) равным 3 В, а порог выключения (**turn-off voltage**) 2 В. В свойствах генератора импульсов (**Clock**) установить частоту 1000 Гц (период 1000 мкс) и с помощью опции **Duty cycle** – требуемую длительность импульса  $t_{и}$ . Получить на экране осциллографа и зафиксировать для отчета диаграммы радиоимпульсов на входе и выходе фильтра.



#### **4. Контрольные вопросы**

1. Как принято определять ширину полосы пропускания узкополосных радиотехнических цепей? Во сколько раз и на сколько децибел ослабляется сигнал на границах полосы пропускания?

2. Почему последовательный LC контур является полосовым фильтром? От чего зависит полоса частот этой цепи?

3. Чем определяются скорость и время нарастания амплитуды колебаний тока в последовательном колебательном контуре при включении гармонической э.д.с. с частотой, равной резонансной частоте контура?

4. От чего зависит и на что влияет постоянная времени последовательного колебательного контура?

5. Как по переходным процессам в полосовом фильтре можно оценить его добротность?

#### **5. Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) наименование работы и цель исследований;
- 3) схемы исследуемых частотно-избирательных цепей и результаты расчета их компонентов;
- 4) амплитудно-частотные характеристики и результаты измерения полосы пропускания фильтра нижних частот и полосового фильтра;
- 5) осциллограммы сигналов на входах и выходах ФНЧ и резонансного усилителя;

#### **Литература**

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – 4-е изд. – М.: Высш. шк., 2003. – 462 с.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – 4-е изд. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
3. Иванов В.И., Титов В.С. Основы теории цепей и сигналов: Учеб. пособие / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2001. – 159 с.