

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИШНКБ ТПУ

\_\_\_\_\_ П.Ф. Баранов

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЛИНЕЙНЫХ АНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ**

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы №2  
по курсу «Основы измерительной техники»

Томск – 2022

ББК 32.811.1я73  
УДК 621.372.037(075.8)  
Я 45

Якимов Е.В. Исследование частотных характеристик линейных аналоговых систем: методические указания по выполнению лабораторной работы №2 – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2022. – 18 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром отделения контроля и диагностики ИШНКБ ТПУ  
« » \_\_\_\_\_ 2022 г. протокол № \_\_\_\_\_

Руководитель ОКД ИШНКБ \_\_\_\_\_ Суржиков А.П.

*Рецензент*

Кандидат технических наук, доцент отделения  
контроля и диагностики ИШНКБ ТПУ

*Е.М. Фёдоров*

Томский политехнический университет, 2022

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1.1. Научиться определять теоретически и экспериментально частотные характеристики аналоговых систем;
- 1.2. Научиться определять теоретически и экспериментально переходные характеристики аналоговых систем;
- 1.3. Исследовать взаимное влияние измерительных преобразователей при последовательном соединении.

## 2. КРАТКИЕ ПОЯСНЕНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

### 2.1. Аналоговые линейные системы

Связь между входным  $x(t)$  и выходным  $y(t)$  сигналами некоторой аналоговой системы называется **функцией преобразования**

$$y(t)=F[x(t)]. \quad (1)$$

**Линейными** называют системы, для которых выполняется принцип суперпозиции: реакция на линейную комбинацию сигналов равна линейной комбинации реакций на эти сигналы, поданные на вход по отдельности.

$$F[x_1(t)+x_2(t)]=F[x_1(t)]+F[x_2(t)]. \quad (2)$$

$$F[C \cdot x(t)]=C \cdot F[x(t)], \quad \text{где } C=\text{const}. \quad (3)$$

Реакция на  **$\delta$ -импульс** называется **импульсной характеристикой системы –  $h(t)$** . Физически реализуемые системы удовлетворяют двум условиям

$$h(t)=0 \text{ при } t<0 \text{ и } \int_0^{\infty} |h(t)| dt < \infty. \quad (4)$$

Реакция системы на единичное ступенчатое воздействие называется **переходной характеристикой  $h_1(t)$** . Переходная характеристика связана с импульсной характеристикой зависимостью  $h_1(t) = \int h(t) dt$ .

Импульсная и переходная характеристика системы позволяют определить реакцию системы на произвольный входной сигнал (в соответствии с **интегралом Дюамеля**) в одной из четырёх форм

$$y(t) = x(0) \cdot h_1(t) + \int_0^t x'(\tau) \cdot h_1(t-\tau) d\tau. \quad (5)$$

$$y(t) = x(0) \cdot h_1(t) + \int_0^t x'(t-\tau) \cdot h_1(\tau) d\tau. \quad (6)$$

$$y(t) = x(t) \cdot h_1(0) + \int_0^t x(\tau) \cdot h(t-\tau) d\tau. \quad (7)$$

$$y(t) = x(t) \cdot h_1(0) + \int_0^t x(t-\tau) \cdot h(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Для анализа системы применяются также **преобразование Лапласа и преобразование Фурье**

$$Y^*(s) = \int_0^{\infty} y(t) \cdot e^{-st} dt = \int_0^{\infty} e^{-st} dt \cdot \int_0^t x(\tau) \cdot h(t-\tau) d\tau, \quad (9)$$

$$Y^*(s) = H(s) \cdot X^*(s), \quad (10)$$

$$H(s) = \int_0^{\infty} h(\tau) \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau, \quad X(s) = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-s \cdot t} dt. \quad (11)$$

где  $Y^*(s), X^*(s)$  – изображения сигналов (**преобразования Лапласа** сигналов);  
 $H(s)$  – **передаточная функция** системы.

$$Y^*(j \cdot \omega) = \int_0^{\infty} y(t) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} dt, \quad X^*(j \cdot \omega) = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} dt, \quad (12)$$

$$H(j \cdot \omega) = \int_0^{\infty} h(\tau) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot \tau} d\tau = H(\omega) \cdot e^{j \cdot \phi(\omega)}, \quad (13)$$

$$Y^*(j \cdot \omega) = H(j \cdot \omega) \cdot X^*(j \cdot \omega). \quad (14)$$

где  $Y^*(j \cdot \omega), X^*(j \cdot \omega)$  – изображения сигналов (**преобразования Фурье** сигналов);  
 $H(j \cdot \omega)$  – **частотная характеристика** системы (зависимость выходного сигнала при воздействии входного гармонического сигнала от частоты);

$H(\omega), \phi(\omega)$  – **амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики**.

Частотная характеристика системы может быть определена по передаточной функции путём подстановки  $s = j \cdot \omega$ .

Для линейной системы выполняется принцип суперпозиции

$$Y^*(s) = H(s) \cdot X_1^*(s) + H(s) \cdot X_2^*(s) = H(s) \cdot [X_1^*(s) + X_2^*(s)], \quad (15)$$

$$Y^*(s) = C \cdot H(s) \cdot X^*(s) = H(s) \cdot C \cdot X^*(s). \quad (16)$$

При последовательном / параллельном соединении линейных систем общая передаточная функция равна произведению / сумме передаточных функций этих систем

$$H^*(s) = H_1(s) \cdot H_2(s), \quad (17)$$

$$H^*(s) = H_1(s) + H_2(s). \quad (18)$$

В том случае, если при проектировании системы заданы требования в частотной области, прежде всего, производится расчёт передаточной функции (частотной характеристики) системы. По передаточной функции далее можно определить импульсную (переходную) характеристику системы.

Например, во многих случаях полученная передаточная функция системы  $H(s)$  может быть представлена в дробно-рациональной форме

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + \dots + b_m \cdot s^m}{a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + \dots + a_n \cdot s^n}, \quad (19)$$

причём  $m < n$  и коэффициенты  $a_i, b_i$  – действительные числа.

Вычислив корни знаменателя  $A(s)$ , т.е. **полюса системы**  $sp_i$ , можно представить передаточную функцию в виде

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + \dots + b_m \cdot s^m}{a_n \cdot (s - sp_0)^{k_0} \cdot (s - sp_1)^{k_1} \dots (s - sp_{n-1})^{k_{n-1}}}, \quad (20)$$

где  $k_i$  – кратность корней.

В случае, если все полюса простые ( $k_i=1$ ), импульсная характеристика системы определяется выражением

$$h(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{B(sp_i)}{A'(sp_i)} \cdot e^{t \cdot sp_i}, \quad t > 0. \quad (21)$$

Переходная характеристика определяется в этом случае выражением

$$h_1(t) = \frac{B(0)}{A(0)} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{B(sp_i)}{sp_i \cdot A'(sp_i)} \cdot e^{t \cdot sp_i}, \quad t > 0. \quad (22)$$

## 2.2. Функции Mathcad для моделирования аналоговых линейных систем

В качестве исходных данных берётся описание передаточной функции  $H(s)$  системы в операторной форме. По передаточной функции определяется переходная характеристика системы  $h_1(t)$  – данный переход осуществляется функцией **invlaplace**.

Например, исследуется фильтр низких частот (ФНЧ) 1 порядка:  
тип фильтра – ФНЧ; аппроксимация – по Баттерворту;  
частота среза  $F_c = 100$  Гц; коэффициент усиления –  $K_0=10$ ; порядок фильтра – 1.

2.2.1. Для фильтра 1 порядка передаточная функция записывается в виде

$$F_c := 100 \quad \underline{K_0} := 10 \quad B_0 := K_0 \quad \text{– параметры фильтра}$$

$$A_0 := 1 \quad A_1 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F_c} \quad \text{– коэффициенты фильтра}$$

$$H(s) := \frac{B_0}{A_0 + s \cdot A_1} \quad \text{– передаточная функция фильтра}$$

2.2.2. Переходная характеристика  $h_1(t)$  вычисляется следующим образом

$$h_1(t) := H(s) \cdot \frac{1}{s} \text{ invlaplace} \rightarrow 10 - 10 \cdot e^{-200 \cdot \pi \cdot t}$$

2.2.3. Задавая время  $t_x$  в некотором диапазоне, можно построить график переходной характеристики.

$$t_{min} := 0 \quad t_{max} := 2 \cdot F_c^{-1} \quad \underline{dt} := \frac{t_{max} - t_{min}}{1000} \quad t_x := t_{min}, t_{min} + dt .. t_{max}$$

2.2.4. По переходной характеристике можно определить **время установления** выходного сигнала системы на уровне  $\pm 5\%$  от установившегося значения (95% или 105% при наличии колебаний). На рис. 1 уровни  $100 \pm 5\%$  показаны в виде прямых линий, установившееся значение определяется путём подстановки заведомо большого значения времени  $t_x$  (например,  $10^6$  с).

Для определения времени установления  $t_{set}$  можно воспользоваться функцией **root()**.

$$t_s := 0 \quad t_{set} := \text{root} \left( h_1(t_s) - h_1(10^6) \cdot 0.95, t_s \right) \quad t_{set} = 4.767856 \times 10^{-3}$$

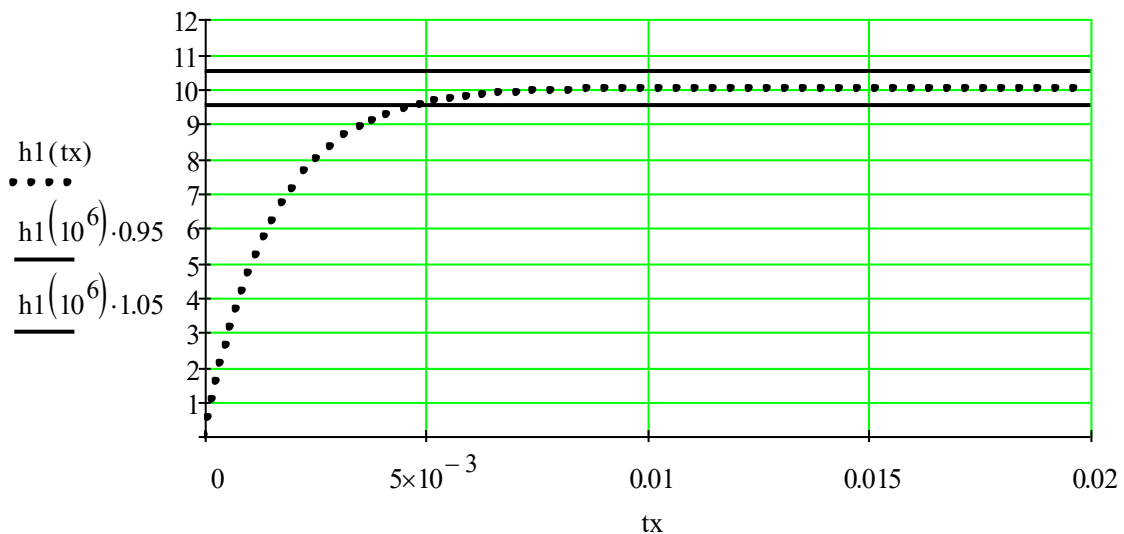


Рис. 1. Переходная характеристика ФНЧ 1 порядка

**2.2.5. Для анализа частотной характеристики системы** можно воспользоваться заменой переменной  $s = j \cdot \omega$  в передаточной функции  $H(s)$ .

Диапазон частот для вычисления частотной характеристики может быть задан следующим образом

$$F_{\min} := 0 \quad F_{\max} := 5 \cdot F_c \quad dF := \frac{F_{\max} - F_{\min}}{500} \quad f := F_{\min}, F_{\min} + dF .. F_{\max}$$

$$j := \sqrt{-1} \quad H_f(f) := H(2 \cdot \pi \cdot j \cdot f)$$

Функция  $H_f(f)$  в данном случае является частотной характеристикой системы. Модуль данной функции определяет амплитудно-частотную характеристику (**АЧХ**), а функция Mathcad **arg()** определяет фазо-частотную характеристику (**ФЧХ**).

$$\varphi(f) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(H_f(f))$$

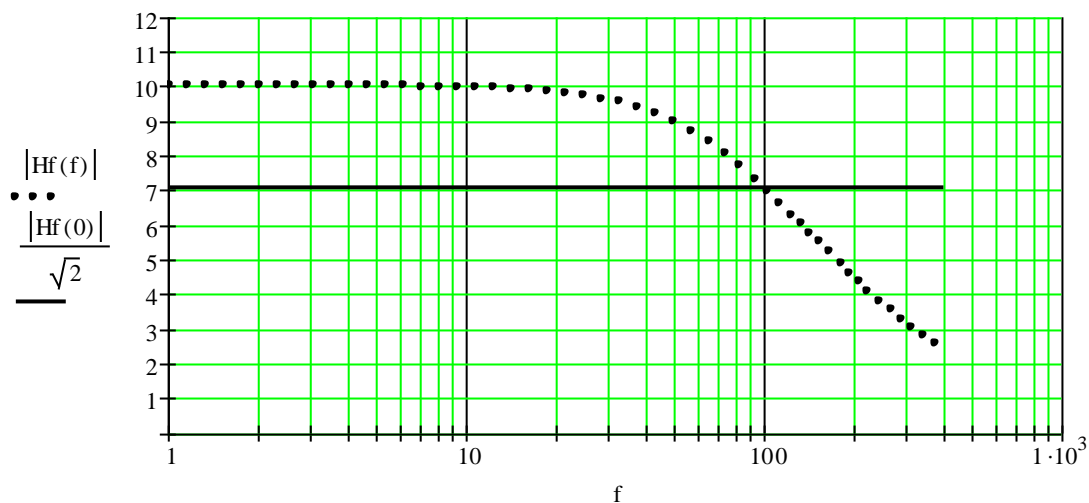


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ 1 порядка

По графику АЧХ можно определить **частоту среза** – на данной частоте пересекаются график АЧХ и прямая, определяющая уровень спада на 3 дБ.

$$|H_f(0)| = 10.000000 \quad |H_f(F_c)| = 7.071068 \quad |H_f(2 \cdot F_c)| = 4.472136$$

### 2.3. Моделирование RC-цепей первого порядка

Рассмотрим фильтр низких частот (ФНЧ) 1 порядка, реализуемый с помощью резистора  $R1$  и конденсатора  $C1$ , рис. 3.

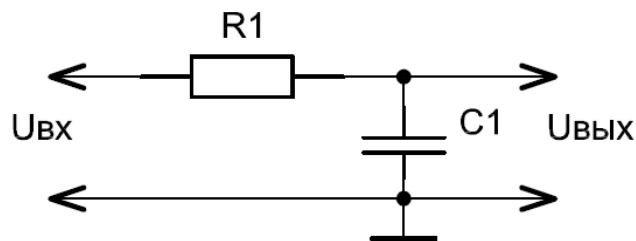


Рис. 3. Схема ФНЧ 1 порядка

$$R1 := 10 \cdot 10^3 \quad C1 := 100 \cdot 10^{-9} \quad \text{– параметры элементов}$$

$$B_0 := 1 \quad A_0 := 1 \quad A_1 := R1 \cdot C1 = 1.000 \times 10^{-3} \quad \text{– коэффициенты фильтра}$$

$$H(s) := \frac{B_0}{A_0 + s \cdot A_1} \quad \text{– передаточная функция фильтра}$$

Задаём диапазон частот для вычисления частотной характеристики

$$F_{\min} := 0 \quad F_{\max} := 5 \cdot F_c \quad dF := \frac{F_{\max} - F_{\min}}{500} \quad f := F_{\min}, F_{\min} + dF .. F_{\max}$$

$$j := \sqrt{-1}$$

$$Hf(f) := H(2 \cdot \pi \cdot j \cdot f) \quad \text{– частотная характеристика ФНЧ}$$

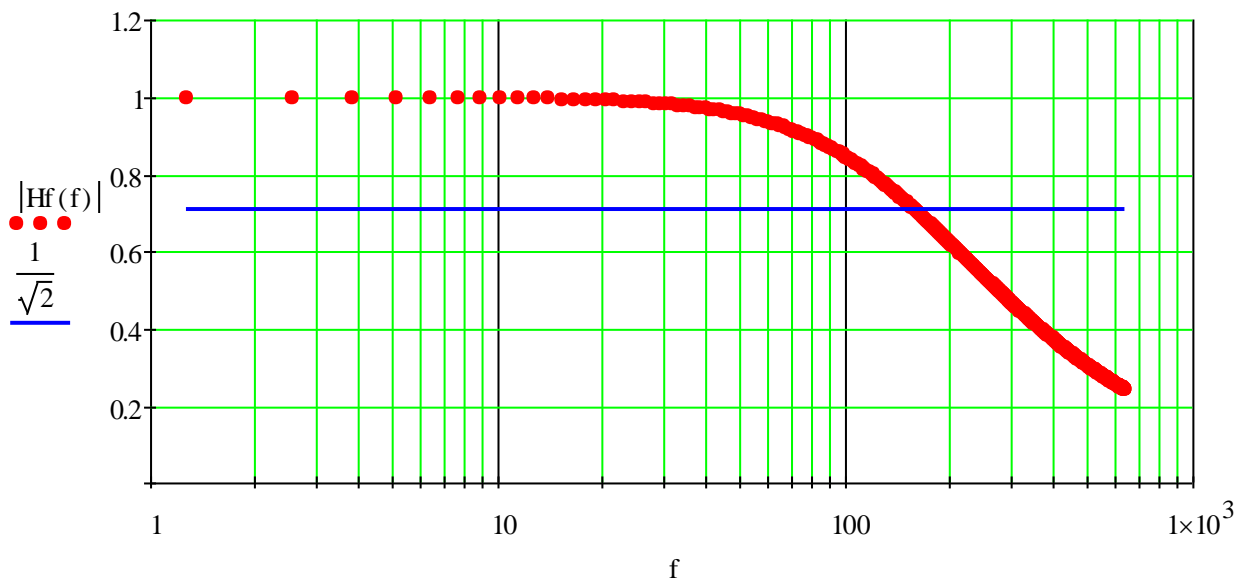


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ 1 порядка

По графику АЧХ можно определить **частоту среза** – на данной частоте пересекаются график АЧХ и прямая, определяющая уровень спада на 3 дБ (в  $\sqrt{2}$  раз).

Частоту среза можно определить, решая данное уравнение с помощью функции **root()**,

Enter a guess value for the solution, and modify until the solver is converging appropriately. It is helpful to graph the function to find a value that is reasonably close to the root as a starting guess.

$$fc := 1 \cdot 10^2$$

$$Fc := \text{root}\left(\left|Hf(fc)\right| - \frac{1}{\sqrt{2}}, fc\right) = 159.155$$

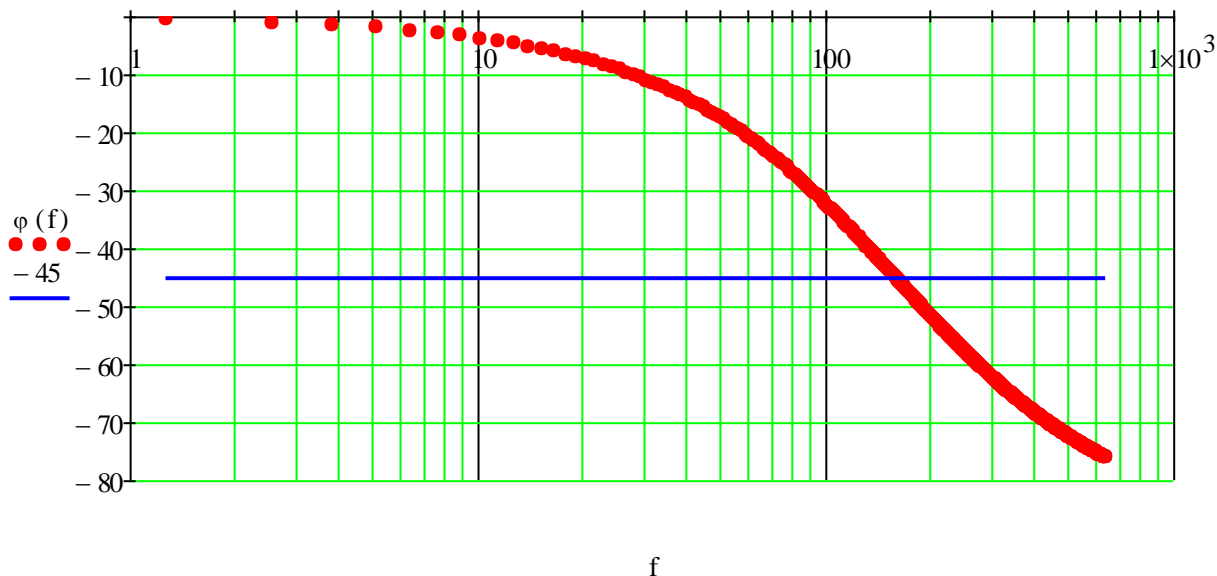


Рис. 5. Фазо-частотная характеристика ФНЧ 1 порядка

## 2.4. Моделирование последовательного соединения RC-цепей

Рассмотрим фильтр низких частот (ФНЧ) 2 порядка, реализуемый с помощью последовательно соединённых RC-цепей 1 порядка (цепь R1-C1 и цепь R2-C2), рис. 6.

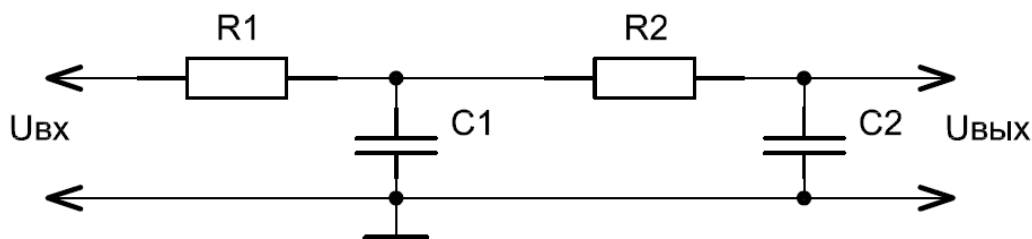


Рис. 6. Схема ФНЧ 2 порядка, реализуемого с помощью последовательно соединённых RC-цепей 1 порядка

$$R1 := 10 \cdot 10^3 \quad C1 := 100 \cdot 10^{-9}$$

$$R2 := 10 \cdot 10^3 \quad C2 := 100 \cdot 10^{-9}$$

– параметры элементов

$$B_0 := 1 \quad A_0 := 1 \quad A_1 := R1 \cdot C1 + R1 \cdot C2 + R2 \cdot C2 = 3.000 \times 10^{-3}$$

$$A_2 := R1 \cdot R2 \cdot C2^2 = 1.000 \times 10^{-6}$$

– коэффициенты фильтра

$$H(s) := \frac{B_0}{A_0 + s \cdot A_1 + s^2 \cdot A_2}$$

– передаточная функция фильтра

Задаём диапазон частот для вычисления частотной характеристики

$$F_{\min} := 0 \quad F_{\max} := 5 \cdot F_c \quad dF := \frac{F_{\max} - F_{\min}}{500} \quad f := F_{\min}, F_{\min} + dF .. F_{\max}$$



$$j := \sqrt{-1}$$

$$Hf(f) := H(2 \cdot \pi \cdot j \cdot f)$$

– частотная характеристика ФНЧ

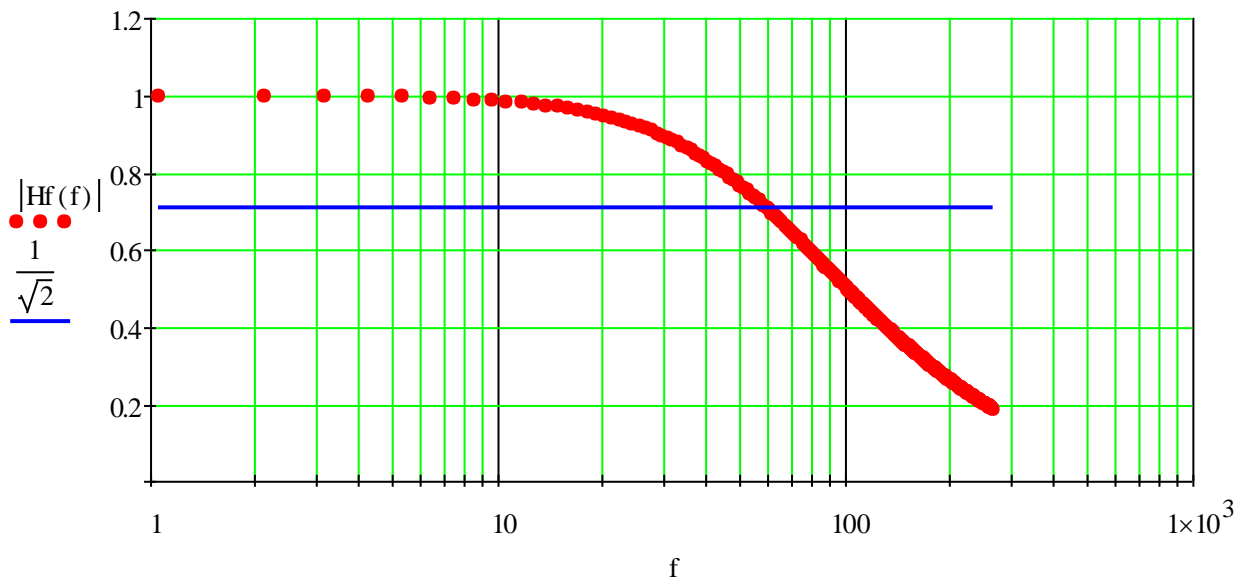


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ 2 порядка, реализуемого с помощью последовательно соединённых RC-цепей 1 порядка

Частота среза равна

$$f_c := 1 \cdot 10^2$$

$$F_c := \text{root}\left(\left|Hf(f_c)\right| - \frac{1}{\sqrt{2}}, f_c\right) = 59.562$$

$$\varphi(F_c) = -52.550$$

– значение ФЧХ фильтра на частоте среза

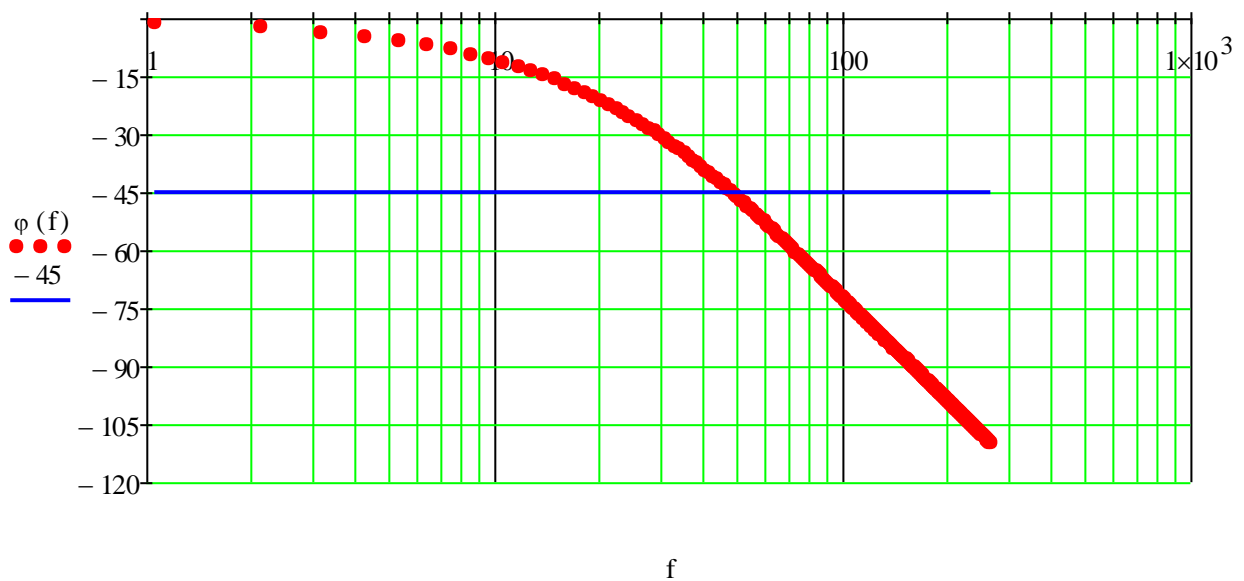


Рис. 8. Фазо-частотная характеристика ФНЧ 2 порядка, реализуемого с помощью последовательно соединённых RC-цепей 1 порядка

## 2.5. Моделирование последовательного соединения RC-цепей с буферным усилителем

Рассмотрим фильтр низких частот (ФНЧ) 2 порядка, реализуемый с помощью последовательно соединённых RC-цепей 1 порядка с буферным усилителем (цепь R1-C1, усилитель DA1 и цепь R2-C2), рис. 9.

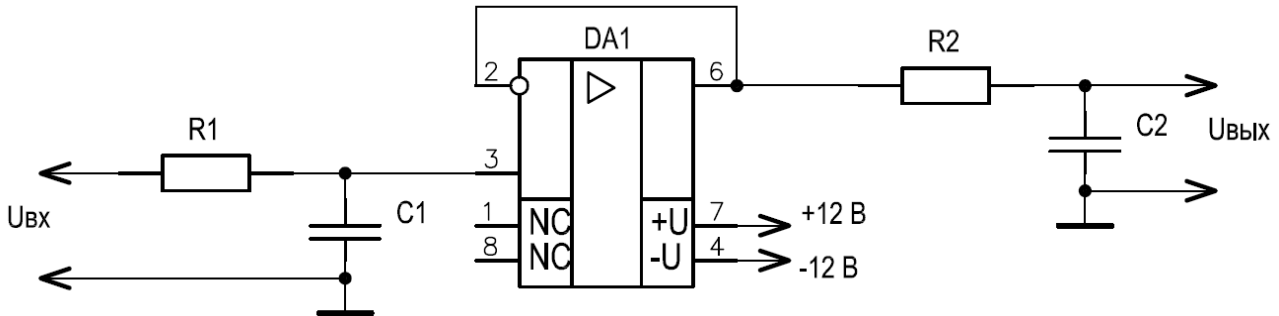


Рис. 9. Схема ФНЧ 2 порядка, реализуемого с помощью последовательно соединённых RC-цепей 1 порядка с буферным усилителем

$$R1 := 10 \cdot 10^3 \quad C1 := 100 \cdot 10^{-9}$$

$$R2 := 10 \cdot 10^3 \quad C2 := 100 \cdot 10^{-9}$$

– параметры элементов

$$B_0 := 1 \quad A_0 := 1 \quad A_1 := R1 \cdot C1 + R2 \cdot C2 = 2.000 \times 10^{-3}$$

$$A_2 := R1 \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2 = 1.000 \times 10^{-6}$$

– коэффициенты фильтра

$$H(s) := \frac{B_0}{A_0 + s \cdot A_1 + s^2 \cdot A_2}$$

– передаточная функция фильтра

Задаём диапазон частот для вычисления частотной характеристики

$$F_{min} := 0 \quad F_{max} := 5 \cdot F_c \quad dF := \frac{F_{max} - F_{min}}{500} \quad f := F_{min}, F_{min} + dF .. F_{max}$$

$$j := \sqrt{-1}$$

$$Hf(f) := H(2 \cdot \pi \cdot j \cdot f)$$

– частотная характеристика ФНЧ

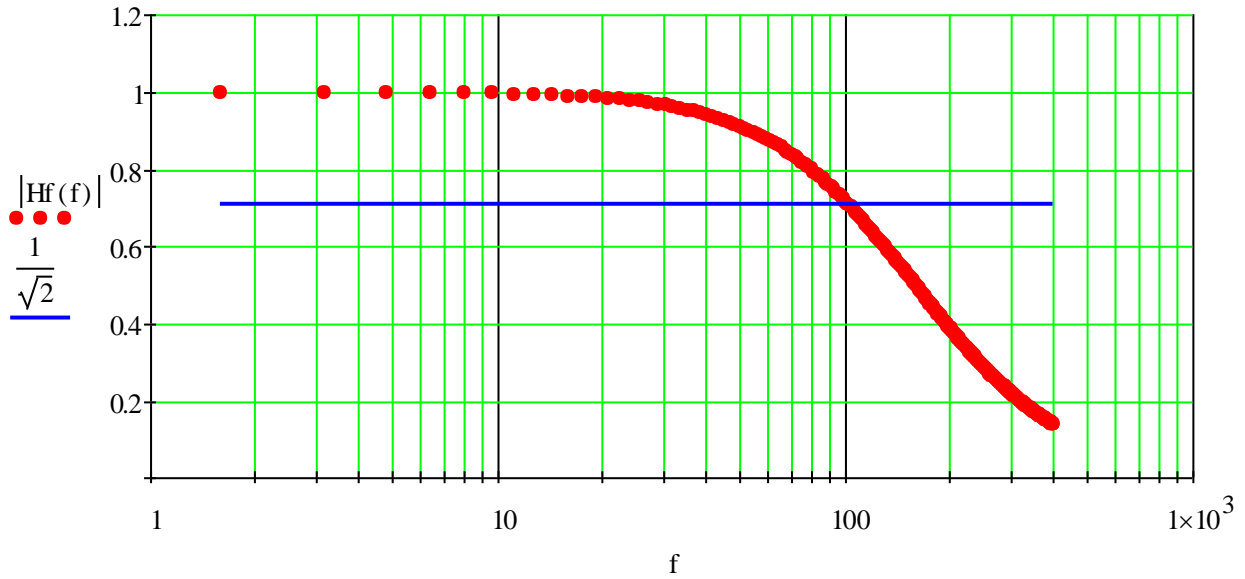


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ 2 порядка, реализуемого с помощью последовательно соединённых RC-цепей 1 порядка с буферным усилителем

Частота среза равна

$$f_c := 1 \cdot 10^2$$

$$F_c := \text{root} \left( |Hf(f_c)| - \frac{1}{\sqrt{2}}, f_c \right) = 102.431$$

$$\varphi(F_c) = -65.530$$

– значение ФЧХ фильтра на частоте среза

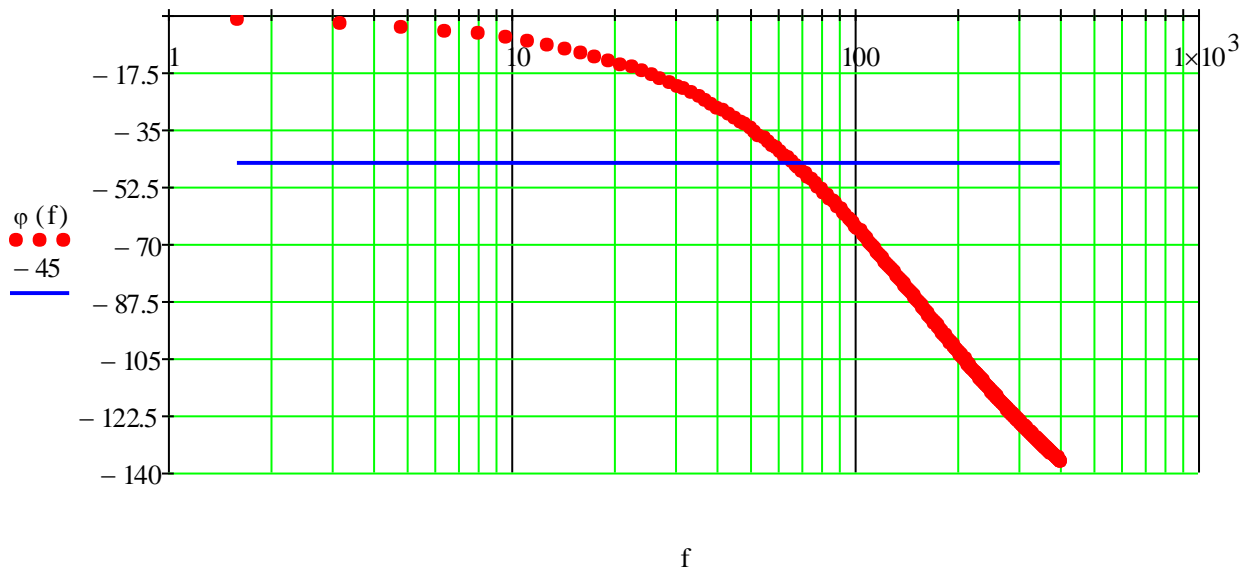


Рис. 11. Фазо-частотная характеристика ФНЧ 2 порядка, реализуемого с помощью последовательно соединённых RC-цепей 1 порядка с буферным усилителем

### 3. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В лабораторной работе используются следующие приборы:

- функциональный генератор сигналов SFG-2104;
- вольтметр универсальный цифровой В7-78/1;
- цифровой осциллограф АСК-2067;
- измеритель RLC E7-22;
- блок питания LPS-305.

Макет, на котором размещены резисторы, конденсаторы и буферный усилитель, показан на рисунке 12.

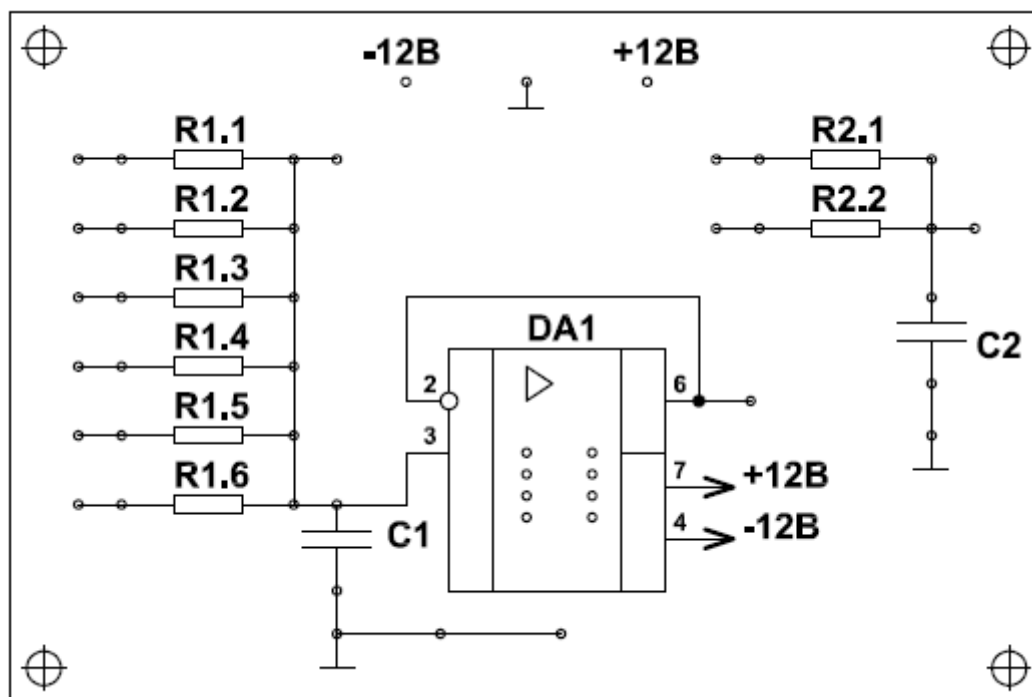


Рис. 12. Макет для исследования частотных характеристик RC-цепей

При выполнении расчётов используется пакет программ Mathcad версии 2000 и выше. Отчёты по лабораторной работе необходимо представить в формате \*.doc, \*.docx или \*.pdf.

### 4. ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 4.1. Произвести теоретический расчёт в пакете программ Mathcad системы первого порядка на основе RC-цепи, системы второго порядка на основе последовательно соединённых RC-цепей первого порядка, а также системы второго порядка на основе последовательно соединённых RC-цепей первого порядка с буферным усилителем.
- 4.2. Экспериментально определить АЧХ, ФЧХ и переходные характеристики систем первого и второго порядка. Сравнить экспериментальные результаты с теоретическими.
- 4.3. Сравнить параметры фильтров второго порядка на основе последовательно соединённых RC-цепей первого порядка при наличии и отсутствии буферного усилителя.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Свойства аналоговых линейных систем.
- 5.2. Свойства  $\delta$ -импульса и прямоугольного ступенчатого сигнала.
- 5.3. Что такое импульсная и переходная характеристика системы. Взаимосвязь импульсной и переходной характеристик.
- 5.4. Что такое передаточная функция и частотная характеристика системы.
- 5.5. Взаимосвязь импульсной характеристики и передаточной функции системы.
- 5.6. Как определяется выходной сигнал системы при некотором произвольном входном сигнале (интеграл Дюамеля).
- 5.7. Как определяется время установления системы.
- 5.8. Как определить по графику АЧХ частоту среза фильтра.

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ЗАДАНИЯ

- 6.1. Собрать схему RC-фильтра первого порядка, рис. 13. Сопротивление R1 фильтра задаётся преподавателем по вариантам (номер варианта соответствует номеру рабочей подгруппы), конденсатор C1 для всех вариантов одинаковый:

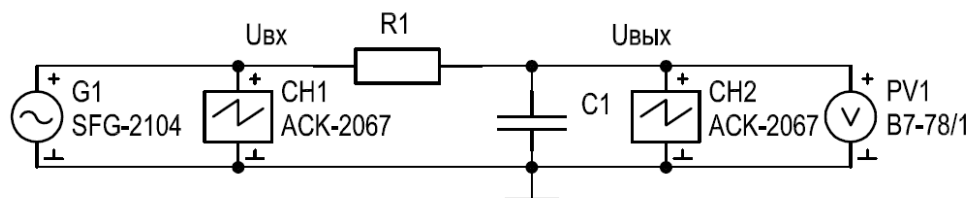


Рис. 13. Схема подключения приборов для исследования ФНЧ 1 порядка

Таблица 1.

Вариант	1	2	3	4	5	6
Резистор R1	R1.1	R1.2	R1.3	R1.4	R1.5	R1.6

Перед сборкой схемы (до подключения кабелей и проводников) измерить сопротивление резистора R1 с помощью цифрового вольтметра В7-78/1, а также ёмкость конденсатора C1 с помощью измерителя RLC E7-22.

- 6.2. Выполнить расчёт по методике, представленной в п. 2.3, АЧХ, ФЧХ и переходной характеристики фильтра первого порядка, используя результаты измерения параметров, полученные в п. 6.1. Определить теоретическое значение частоты среза  $F_{c\text{теор}}$ , значение фазового сдвига на частоте среза  $\varphi_{\text{теор}}(F_{c\text{теор}})$  и время установления  $t_{\text{set}_{\text{теор}}}$  (при отклонении  $\pm 5\%$ ).
- 6.3. Подать на вход фильтра гармонический сигнал с выхода OUTPUT 50  $\Omega$  генератора SFG-2104. Амплитуда сигнала должна находиться в интервале от 2 до 10 В.
- 6.4. Провести исследование АЧХ и ФЧХ фильтра.  
Для этого необходимо изменять частоту входного сигнала  $f_x$  в диапазоне от 50 Гц до, примерно,  $10 \cdot F_{c\text{теор}}$ . Обязательно провести измерения на частоте, равной теоретическому значению частоты среза  $F_{c\text{теор}}$ .  
На каждой частоте необходимо измерять цифровым вольтметром В7-78/1 или осциллографом входное  $U_{\text{вх}}$  и выходное  $U_{\text{вых}}$  напряжение. Экспериментальное значение АЧХ определяется отношением

$$H_{\text{ЭКСП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

Следует отметить, что при измерении осциллографом важно проводить измерение одноимённых параметров входного и выходного напряжения, т.е. либо размаха сигналов  $U_{p-p}$ , либо среднеквадратических значений  $U_{\text{СКЗ}}$  ( $U_{\text{RMS}}$ ).

Измерение фазового сдвига можно провести с помощью осциллографа. Для этого необходимо измерить с помощью курсоров сдвиг по времени  $\Delta T$  между моментами пересечения сигналами нулевого уровня, рис. 14.а. При измерении рекомендуется проверить и выровнять сдвиг нуля сигналов, а затем растянуть их масштаб по времени таким образом, чтобы временная задержка  $\Delta T$  занимала несколько делений. Масштаб по амплитуде для сигналов рекомендуется настроить таким образом, чтобы графики сигналов пересекали нулевой уровень под углом от  $45^\circ$  до  $60^\circ$ , рис. 14.б.

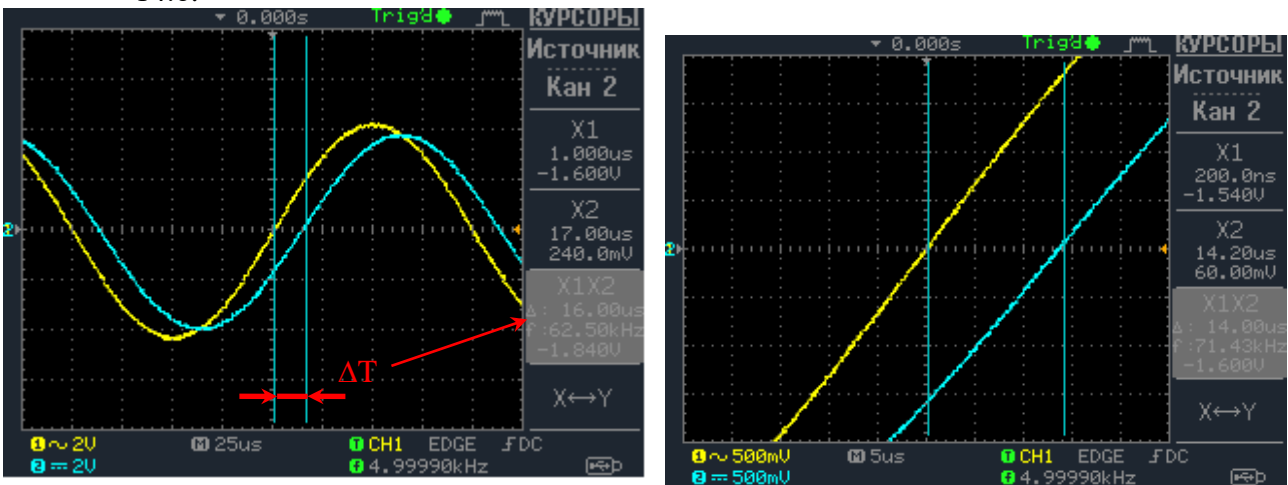


Рис. 14. Измерение фазового сдвига с помощью курсорных измерений в исходном (а) и в увеличенном по времени масштабе (б)

Фазовый сдвиг  $\varphi_{\text{ЭКСП}}$  рассчитывается по формуле

$$\varphi_{\text{ЭКСП}} = 360 \cdot \frac{\Delta T}{T_x} = 360 \cdot \Delta T \cdot f_x$$

Результаты измерений рекомендуется записать в таблицу 2 (количество измерений подбирается таким образом, чтобы обеспечить отображение всех особенностей АЧХ и ФЧХ).

Таблица 2.

$f_x$ , Гц	50	...	...	$F_{c_{\text{теор}}}$	...	$10 \cdot F_c$
$U_{\text{ВХ}}$ , В						
$U_{\text{ВЫХ}}$ , В						
$\Delta T$ , мкс						
$H_{\text{ЭКСП}}$						
$\varphi_{\text{ЭКСП}}$ , град.						

- 6.5. Построить графики экспериментальной и теоретической АЧХ, а также ФЧХ. Сравнить значения характеристик на частоте среза  $F_{c_{теор}}$  (оценить степень отличия полученных результатов).
- 6.6. Перевести генератор SFG-2104 в режим генерации прямоугольных импульсов. Установить частоту сигнала на уровне

$$f_x = \frac{1}{10 \cdot t_{set_{теор}}}$$

Коэффициент заполнения импульса Duty рекомендуется установить равным  $Duty = 50\%$ .

Снять временные диаграммы входного и выходного сигнала с помощью осциллографа.

С помощью курсорных измерений найти уровень 95% от установившегося значения выходного сигнала. Совместить его с одной из вертикальных линий сетки осциллографа и произвести отсчёт времени установления  $t_{set_{эксп}}$  с помощью курсорных измерений времени, рис. 15.

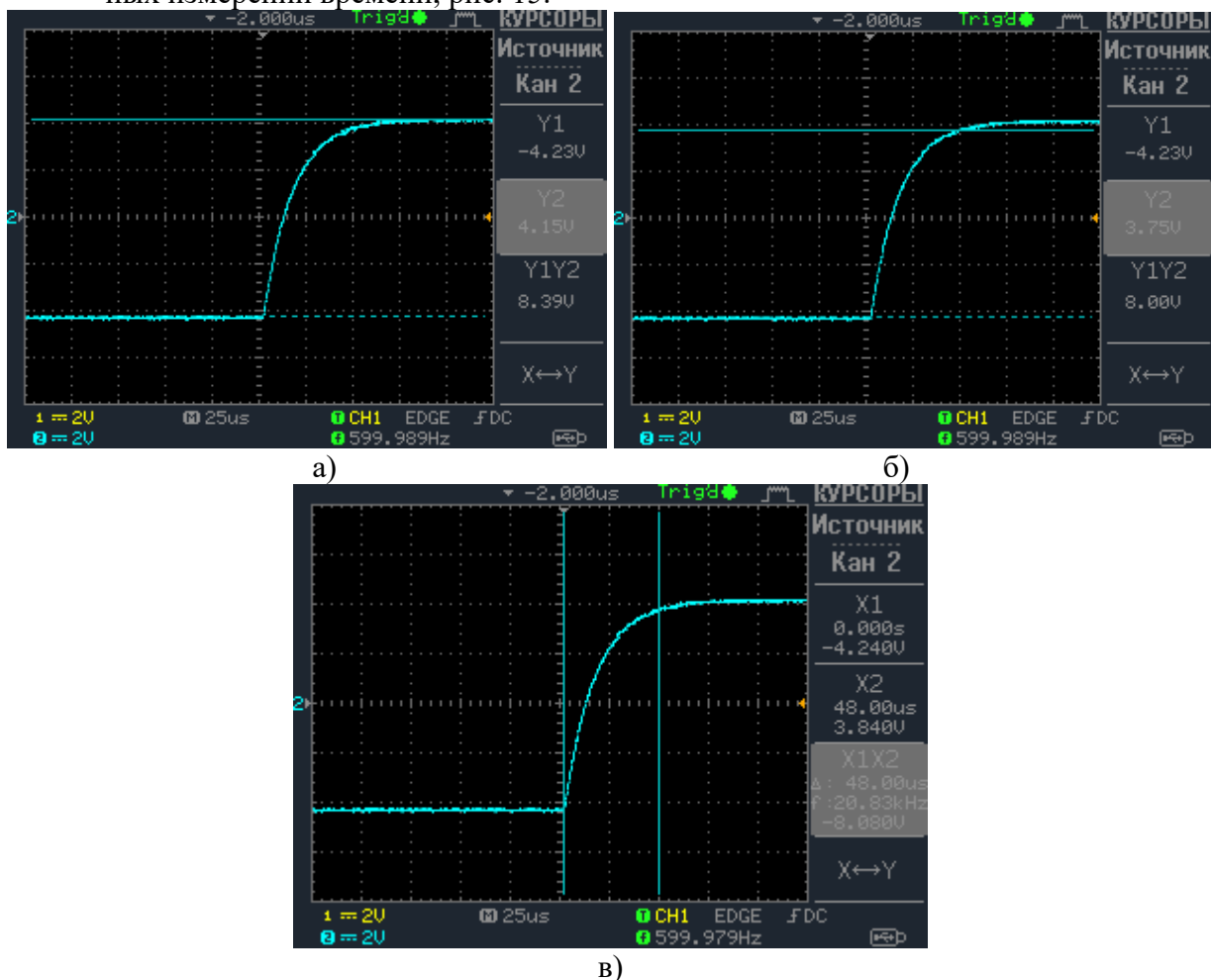


Рис. 15. Измерение времени установления с помощью курсорных измерений: измерение установившегося значения (а), установление уровня 95% (б), измерение времени (в)

- 6.7. Построить график теоретической переходной характеристики фильтра. Сравнить с экспериментальными данными графики и время установления.

\* \* \*

- 6.8. Собрать схему RC-фильтра второго порядка без буферного усилителя, рис. 16. Сопротивления R1 и R2 фильтра задаётся преподавателем по вариантам (номер варианта соответствует номеру рабочей подгруппы), конденсаторы C1 и C2 для всех вариантов одинаковые:

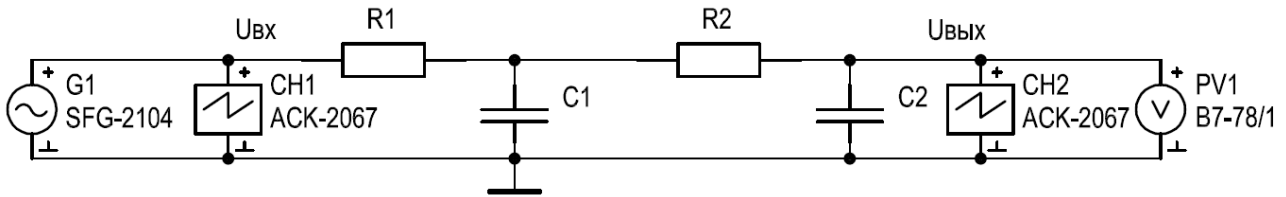


Рис. 16. Схема подключения приборов для исследования ФНЧ 2 порядка без буферного усилителя

Таблица 3.

Вариант	1	2	3	4	5	6
Резистор R1	R1.1	R1.2	R1.3	R1.4	R1.5	R1.6
Резистор R2	R2.1	R2.2	R2.1	R2.3	R2.1	R2.2

Перед сборкой схемы (**до подключения кабелей и проводников**) измерить сопротивление резисторов R1, R2 с помощью цифрового вольтметра В7-78/1, а также ёмкость конденсаторов C1, C2 с помощью измерителя RLC E7-22.

- 6.9. Провести экспериментально исследование и теоретические расчёты фильтра по методике, описанной в п. 6.2 – 6.7. Для теоретических расчётов использовать методику, представленную в п. 2.4.

\* \* \*

- 6.10. Собрать схему RC-фильтра второго порядка с буферным усилителем, рис. 17. Сопротивления R1 и R2 фильтра задаётся преподавателем по вариантам (номер варианта соответствует номеру рабочей подгруппы), конденсаторы C1 и C2 для всех вариантов одинаковые:

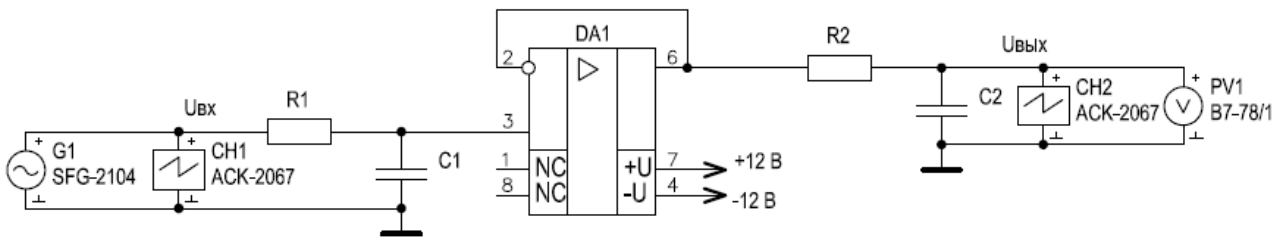


Рис. 17. Схема подключения приборов для исследования ФНЧ 2 порядка с буферным усилителем

Таблица 4.

Вариант	1	2	3	4	5	6
Резистор R1	R1.1	R1.2	R1.3	R1.4	R1.5	R1.6
Резистор R2	R2.1	R2.2	R2.1	R2.3	R2.1	R2.2

Перед сборкой схемы (**до подключения кабелей и проводников**) измерить сопротивление резисторов R1, R2 с помощью цифрового вольтметра В7-78/1, а также ёмкость конденсаторов C1, C2 с помощью измерителя RLC E7-22.



- 6.11. Провести экспериментально исследование и теоретические расчёты фильтра по методике, описанной в п. 6.2 – 6.7. Для теоретических расчётов использовать методику, представленную в п. 2.5.

\* \* \*

- 6.12. Сравнить параметры фильтров второго порядка на основе последовательно соединённых RC-цепей первого порядка при наличии и отсутствии буферного усилителя.

## 7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишмарев В.Ю. Технические измерения и приборы: учебник для вузов – 2-е изд. – М.: Академия, 2012. – 384 с.
2. Панфилов В.А. Электрические измерения. – 8-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 288 с.
3. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: учебное пособие для вузов. – 8-е изд. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. – 704 с.
4. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы: аналоговые и цифровые. – К.: Вища школа, 1986. - 503 с.
5. Электрические измерения. / Под ред. А.В. Фремке, Е.М. Душина. - Л.: Энергия, 1980. – 392 с.
6. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. – М.: Дрофа, 2005. – 405 с.
7. Измерения в электронике: справочник/ Под ред. В.А. Кузнецова.- М.: Энергоатомиздат, 1987. - 512 с.
8. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника в 2 т. Т.1 – М.: ДМК Пресс, 2015. – 828 с.
9. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника в 2 т. Т.2 – М.: ДМК Пресс, 2015. – 942 с.
10. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 303 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЛИНЕЙНЫХ АНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ

Методические указания к лабораторной работе №2  
по курсу «Основы измерительной техники»

Составитель Якимов Евгений Валерьевич