

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Севастопольский государственный университет»

# **Исследование цепей постоянного и переменного тока**

**Методические указания**

к выполнению лабораторной работы

для студентов, обучающихся по направлению

**09.03.02 “Информационные системы и технологии”**

дневной и заочной формы обучения

**Севастополь 2021**

УДК 004.732

**Исследование цепей постоянного и переменного тока.** Методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине "Компьютерная схемотехника" / Сост. В.С. Чернега — Севастополь: Изд-во СевГУ, 2021 — 20 с.

Методические указания предназначены для проведения лабораторных работ по дисциплине “Компьютерная схемотехника“. Целью методических указаний является помощь студентом в освоении методов расчета простейших электрических цепей постоянного и переменного тока и экспериментального исследования свойств таких цепей. Излагаются теоретические и практические сведения необходимые для выполнения лабораторной работы, программа исследований, требования к содержанию отчета.

Методические указания рассмотрены и утверждены на методическом семинаре и заседании кафедры информационных систем (протокол № 1 от 31 августа 2021 г)

Допущено учебно-методическим центром СевГУ в качестве методических указаний.

Рецензент: Кротов К.В., канд. техн. наук, доцент кафедры ИС

## Исследование цепей постоянного и переменного тока

### 1. Цель работы

Экспериментальные исследования цепей постоянного и переменного тока. Приобретение практических навыков измерения электрических параметров с помощью электро- и радиоизмерительных приборов.

### 2. Основные теоретические положения

В электронных устройствах информационно-вычислительной техники широко используются делители напряжения на резисторах (рис.2.1). Они применяются для уменьшения значения входного (питающего) напряжения, задания требуемых напряжений в некоторых точках схемы, установки смещений в усилительных каскадах.

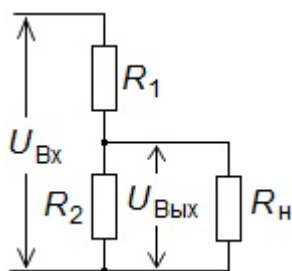


Рисунок 2.1 Схема делителя напряжения

Выходное напряжение делителя  $U_{\text{Вых}}$  зависит от значения входного (питающего) напряжения  $U_{\text{Вх}}$  и значения сопротивления резисторов. Чтобы уменьшить влияние сопротивления нагрузки на выходное напряжение  $U_{\text{Вых}}$  делителя и обеспечения точности делителя напряжения, необходимо выполнять сопротивление резистора  $R_2$  должно быть приблизительно на два порядка меньше (в 100 раз) сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}$  подключаемой к выходу делителя. Если высокая точность не нужна, то эту разницу можно снизить до 10 раз.

Выходное напряжение  $U_{\text{Вых}}$  по известным значениям входного напряжения  $U_{\text{Вх}}$  и сопротивлений резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ , с учетом большого сопротивления нагрузки вычисляется на основании закона Ома по формуле:

$$U_{\text{Вых}} = \frac{U_{\text{Вх}} R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.1)$$

Пример: Рассчитать параметры делителя при входном напряжении 12 В, если напряжение на сопротивлении нагрузки величиной 1 кОм должно быть 3 В.

Решение: Так как  $R_{\text{н}}=1$  кОм, то сопротивление  $R_2$  выбираем равным 10 Ом.  $R_1$  находим из формулы 2.1.

$$R_1 = \frac{(U_{\text{Вх}} - U_{\text{Вых}}) R_2}{U_{\text{Вых}}}.$$

Подставив значения входного  $U_{\text{Вх}}$  и выходного  $U_{\text{Вых}}$  напряжений и резистора  $R_2$ , получим  $R_1 = 30$  Ом.

Определим рассеиваемую мощность резисторов по формуле  $P=I^2R$ . Здесь  $I$  – ток делителя, равный  $U_{\text{вх}}/(R_1+R_2)=12/40=0,3$  А.

Для резистора  $R_1$ :  $P_1 = 0,3^2 \cdot 30 = 2,7$  Вт. Выбираем резистор с ближайшей большей рассеиваемой мощностью 3 Вт. Для резистора  $R_2$ :  $P_1 = 0,3^2 \cdot 10 = 0,9$  Вт. Выбираем резистор со стандартной мощностью  $P_2=1$  Вт.

В качестве  $R_2$  делителя напряжения также может применяться сама нагрузка с её внутренним сопротивлением  $R_{\text{н}}$ . В таком случае,  $R_2$  приравнивается к сопротивлению нагрузки  $R_{\text{н}}$ , и используются те же формулы, которые применимы к двум независимым резисторам.

Очень широко в электронных схемах применяются также RC-цепочки (рис.2.2). Они выполняют функции фильтров, элементов задержки, а также интегрирующих и дифференцирующих цепочек в цифровых схемах.



Рисунок 2.2 – Дифференцирующая (а) и интегрирующая (б) цепочки

RC-цепочки представляют собой четырехполюсник (2 провода на входе и два на выходе). Важнейшей характеристикой четырехполюсника является его комплексный коэффициент передачи  $K(j\omega)$ , т.е. зависимость напряжения (или тока) на выходе четырехполюсника от напряжения (тока) на его входе от частоты входного сигнала. Эта зависимость носит комплексный характер, т.е., изменяется не только напряжение или ток на выходе, но и фаза выходного напряжения (тока) по отношению к фазе входного сигнала. Математически эта зависимость выражается с помощью комплексных чисел (действительно и мнимой частей).

$$\dot{K}_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{вых}}(j\omega)}{\dot{U}_{\text{вх}}(j\omega)}; \quad \dot{K}_I(j\omega) = \frac{\dot{I}_{\text{вых}}(j\omega)}{\dot{I}_{\text{вх}}(j\omega)}.$$

Коэффициент передачи можно представить в комплексной форме в виде:

$$\dot{K}(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

где  $K(\omega)$  – модуль коэффициента передачи;  $\varphi(\omega)$  – аргумент (фаза) коэффициента передачи.

Зависимость  $K(\omega)$  называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) четырехполюсника, а зависимость  $\varphi(\omega)$  – фазо-частотной характеристикой (ФЧХ).

Коэффициент передачи для цепочки (рис.2.2,б) можно рассчитать на основании закона Ома. Он равен

$$K(j\omega) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega\tau},$$

где  $\tau = RC$  – постоянная времени цепочки, это время, в течение которого напряжение на конденсаторе изменяется в  $e \approx 2,7$  раз ( $\approx$  на 37% от исходного значения).

Дифференцирующая цепочка отличается от интегрирующей тем, что выходное напряжение снимается с резистора, а не с конденсатора. Выражение для коэффициента передачи такой цепи определяется по формуле

$$K(j\omega) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau}.$$

Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики интегрирующей и дифференцирующей цепей показаны соответственно на рисунках 2.3а и б. Как видно из графиков, интегрирующая цепочка является фильтром нижних частот (ФНЧ), а дифференцирующая – фильтром верхних частот (ФВЧ).

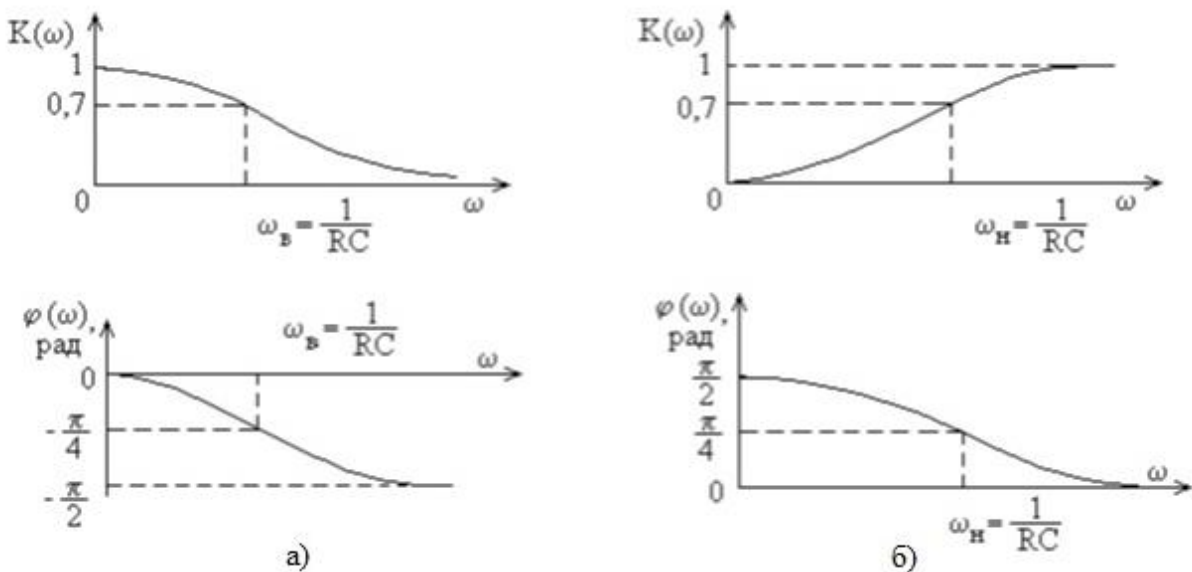


Рисунок 2.3 – АЧХ и ФЧХ интегрирующей (а) и дифференцирующей (б) RC-цепочек

Вид АЧХ интегрирующей и дифференцирующих цепочек в логарифмическом масштабе показан на рис.2.4 а и б.

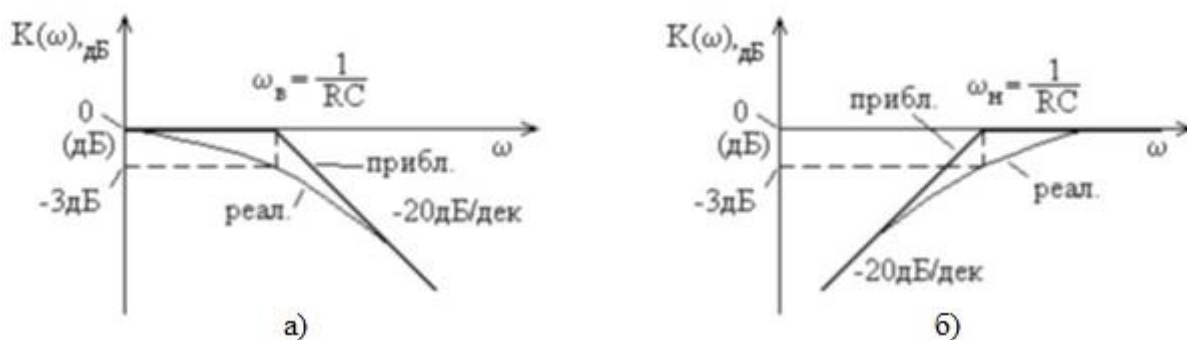


Рисунок 2.4 – Логарифмические АЧХ и ФЧХ интегрирующей (а) и дифференцирующей (б) цепочек

### 3. Описание лабораторной установки и методика создания и исследования схем

Лабораторная установка состоит из персонального компьютера, на котором установлены система симулирования электронных и микропроцессорных систем Proteus VSM. Proteus VSM по умолчанию устанавливается в папку C:\Program\Files\ Labcenter Electronics\Proteus. При запуске программы **ISIS.exe** появляется основное окно (Рисунок 3.1). Оно в свою очередь состоит из нескольких окон.

Самое большое пространство отведено под Рабочее окно, в котором выполняются все основные процессы создания, редактирования и отладки схемы устройства. Слева сверху маленькое окно предварительного просмотра (Overview Window) с его помощью можно перемещаться по окну редактирования (щелкая левой кнопкой мыши по окну предварительного просмотра, можно перемещать окно редактирования по схеме, если схема не вмещается в окно).

Все возможные функции и инструменты Proteus VSM доступны через меню, расположенное в самом верху основного окна программы, через пиктограммы находящиеся под меню и в левом углу основного окна, а также через горячие клавиши, которые могут переназначаться пользователем.

В самом низу основного окна расположены: слева направо кнопки вращения и разворота объекта вокруг своей оси, панель управления интерактивной симуляцией (функции: ПУСК-ПОШАГОВЫЙ РЕЖИМ-ПАУЗА-СТОП). В строке журнала событий отображаются ошибки, подсказки, текущее состояние процесса симуляции и т.д., а также координаты курсора, которые отображаются в дюймах.

Перед созданием и моделированием исследуемой схемы необходимо сначала на бумаге начертить эту схему, затем выполнить следующие действия:

1. Создать новый проект, для чего в меню Файл выбрать соответствующую опцию (при запуске ISIS.exe он создается по умолчанию, как и в любой другой программе).

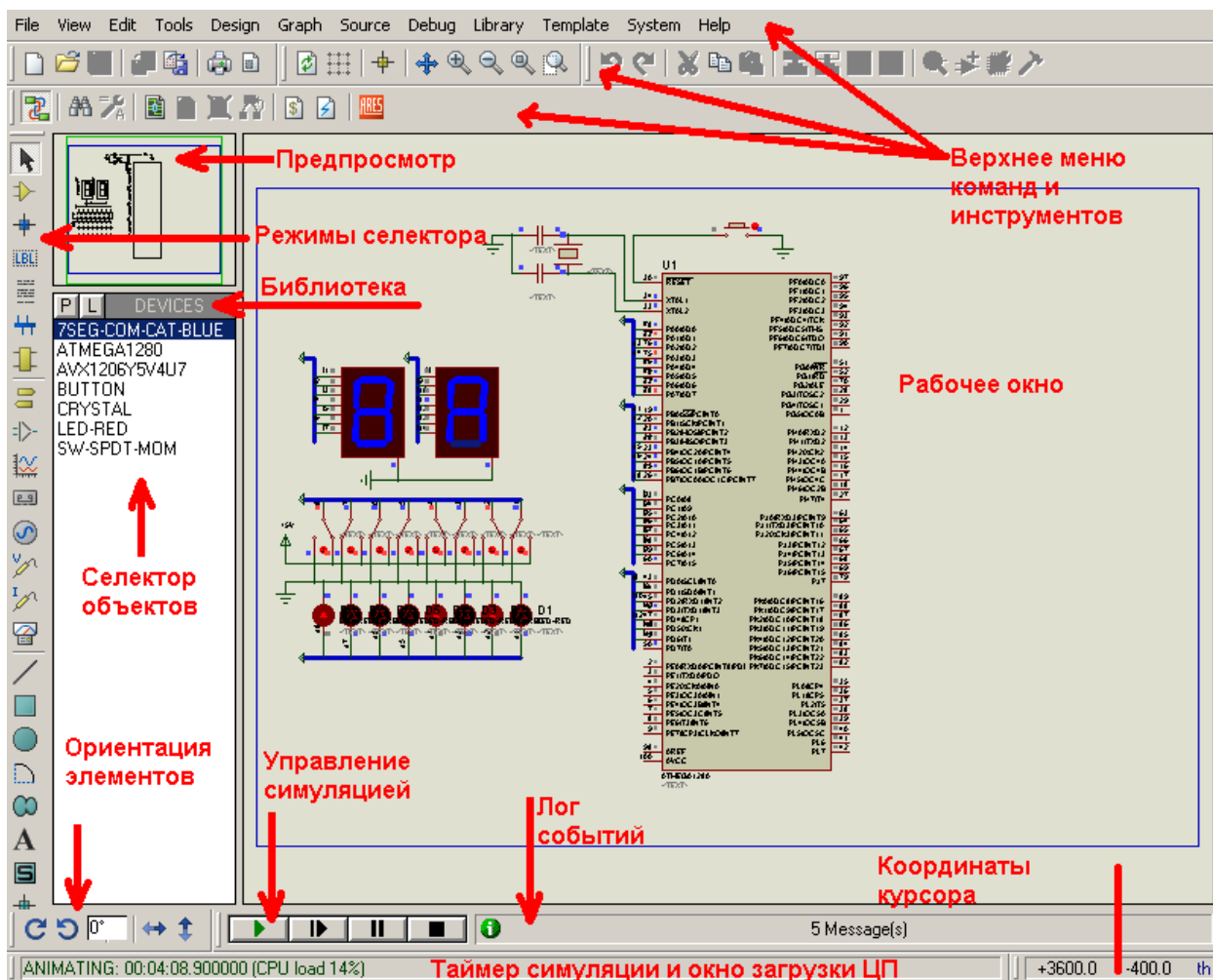


Рисунок 3.1 – Главное окно системы Proteus VSM

2. Зайти в библиотеку компонентов через клавиши меню «Библиотека-Выбор устройства» или нажав кнопку «P» в окне DEVICES (Рисунок 3.2).

3. Выбрать нужные компоненты. При выборе элементов можно воспользоваться группами элементов (в библиотеке элементы сгруппированы по классам), а можно поиском, для чего в строку keywords (Маска) необходимо ввести имя требуемого элемента, после выбора каждого элемента нажать ОК, после чего снова можно зайти в библиотеку. Компоненты набираются по одному экземпляру, размножить их можно уже потом просто выбирая в списке Object Selector.

Для того чтобы изменять параметры объектов, их нужно сначала выделить, что можно сделать только на остановленном проекте. Для выделения одного объекта надо щелкнуть по нему правой кнопкой мыши. Для выделения группы выделить первый элемент, затем нажать CTRL и последовательно щелкать левой кнопкой мыши по всем необходимым объектам. Выделять объекты надо осторожно, повторный щелчок правой кнопкой мыши по выделенному объекту удалит его, (удалить выделенные объекты можно еще, нажав кнопку DELETE). После выбора всех элементов схемы осуществляется переход к следующему пункту.

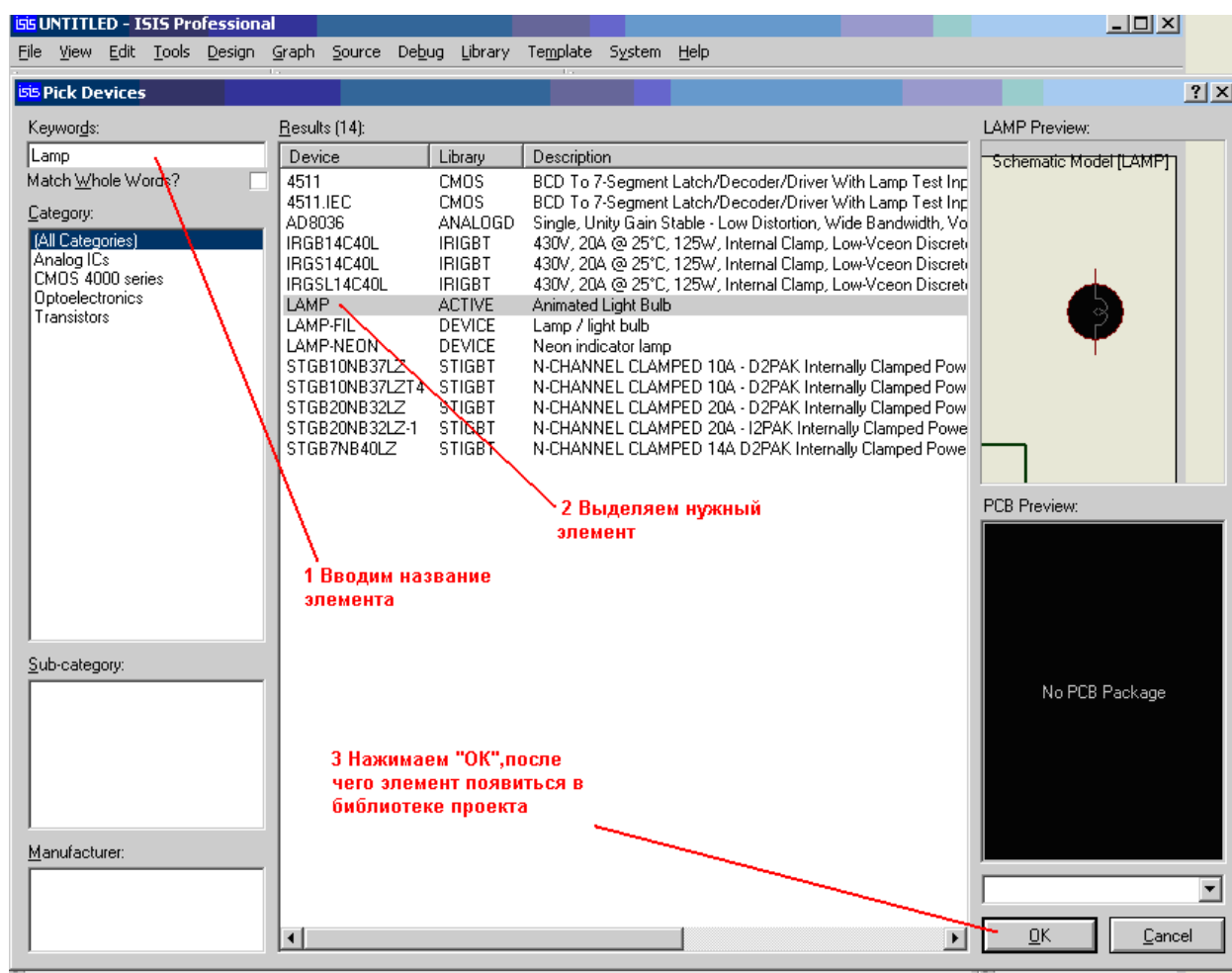


Рисунок 3.2 – Выбор элементов из библиотеки

4. Добавить терминальные элементы питания и сигнальной земли. В окне выбора режима селектора нажать на кнопку «Терминалы» (terminals), выделить Ground (земля) и поместить её на рабочем поле также, как и предыдущие элементы. Аналогично выделить терминал Power (источник питания) и поместить на поле схемы.

5. Задать параметры терминалу Power. Двойным щелчком левой кнопки мыши по элементу Power (источник питания) открыть окно его свойств (рисунок 3.3), в появившемся окне во вкладке Label в графе string задать «+5V» или другое требуемое напряжение и нажать «ОК».

6. Соединить элементы согласно разработанной схеме. Подвести курсор мыши к проводнику, выходящему из элемента (курсор поменяет цвет на зелёный), нажать левой кнопкой мыши и подвести проводник к элементу, с которым нам необходимо его соединить, после чего нажать левую кнопку мыши ещё раз.

Пример подключения генератора сигналов и измерительных устройств (вольтметра, осциллографа и анализатора частотных характеристик показан на рисунке 3.4. Следует учесть, что в процессе выполнения лабораторной работы при моделировании на рабочем поле должна быть только одна из схем: либо для



измерения временных характеристик с помощью осциллографа, либо частотных характеристик с помощью частотного анализатора.

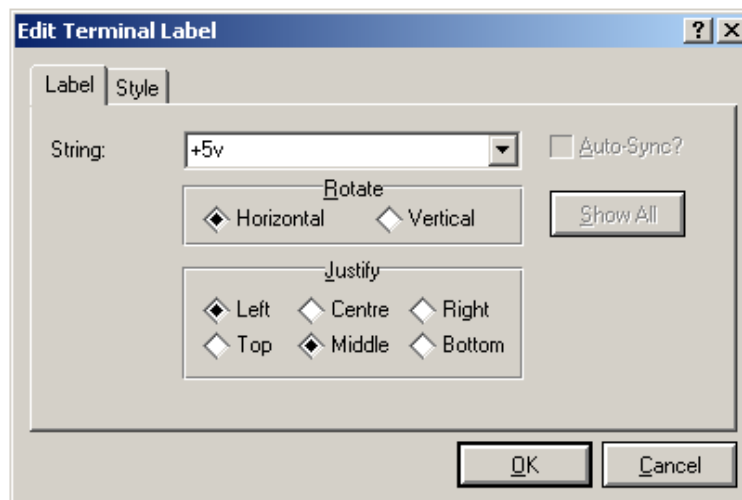


Рисунок 3.3 – Пример задания требуемого напряжения источника питания

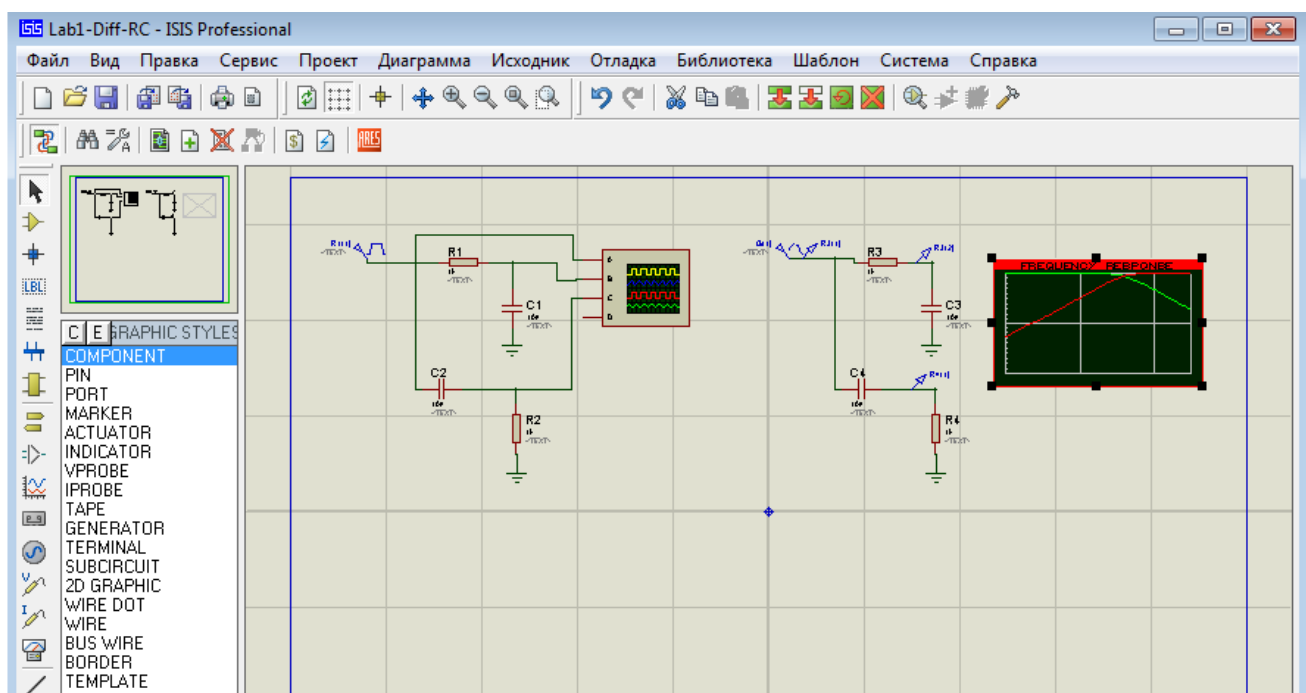


Рисунок 3.4 – Пример изображения схем исследования импульсных и частотных характеристик  $RC$ -цепей

7. Запустить процесс симуляции. Для этого в меню Отладка (DEBUG) выбрать опцию «Запуск» или нажать внизу на кнопку «Воспроизвести».

8. Затем, в зависимости от вида проводимого эксперимента, записать показания измерительных приборов, зарисовать осциллограммы сигналов либо АЧХ и ФЧХ исследуемых схем.

Примечание:

а) источники питания выбираются в библиотеке в категории Miscellaneous, подкатегории BATTERY;

б) переключатели выбираются в библиотеке в категории Switches&Relais, элемент BUTTON;

в) регулируемый резистор выбирается в библиотеке в категории Resistors, подкатегории VARIABLE, элемент POT-HG;

г) трансформаторы и катушки индуктивности выбираются в категории Inductors, для трансформатора – элемент TRAN;

д) измерительные приборы, щупы и другие виртуальные инструменты выбираются в левом крайнем столбце селекторов, в частности, анализатор частотных характеристик выбирается в селекторе Диаграмма, элемент FREQUENCY.

Для измерения АЧХ и ФЧХ цепи в программе Proteus необходимо использовать инструменты:

- генератор (режим Generator Mode, выбрать “sine”);
- диаграмма (режим Graph Mode, выбрать “Frequency”);
- пробник (режим Probe Mode, выбрать щуп напряжения).

На первом скриншоте (Рис.1) эти инструменты отмечены стрелками.

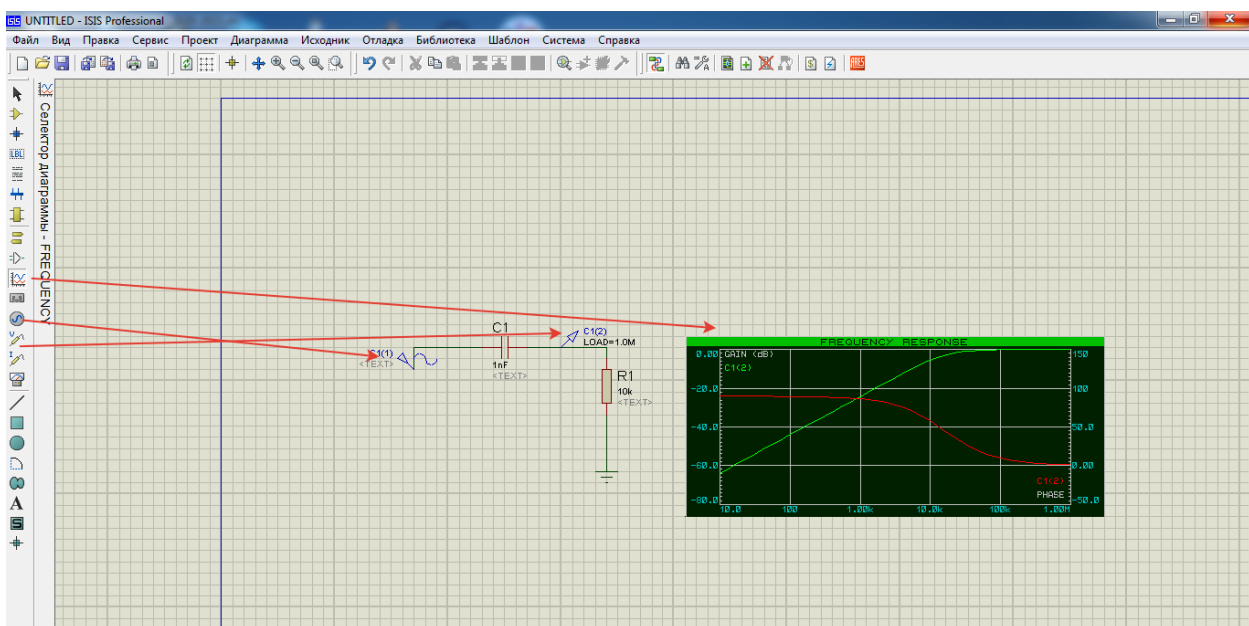


Рисунок 3.5 – Общий вид рабочего окна программы в режиме измерения АЧХ и ФЧХ

Прежде чем приступить к измерениям, необходимо собрать исследуемую схему, подключив к ее входу генератор (источник сигнала). Его настройки по умолчанию показаны на рисунке 3.6.

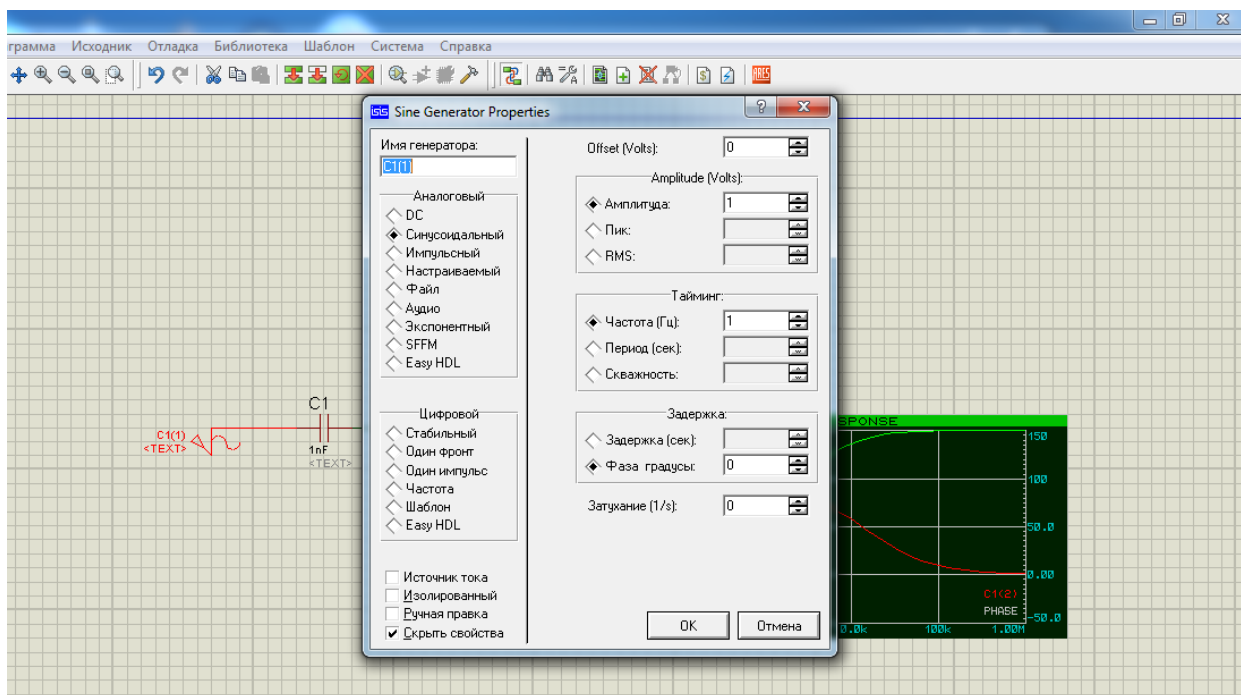


Рисунок 3.6 – Стандартные настройки генератора

Вместо осциллографа следует использовать графический анализатор (инструмент «Диаграмма» в режиме «Frequency». Чтобы разместить анализатор АЧХ на рабочем столе, нужно выделить пиктограмму «Graph Mode» и выбрать, устройство «Frequency», перевести курсор на свободное место и щелкнуть левой кнопкой мыши (ЛКМ). Затем следует растянуть экран анализатора до максимально возможного размера.

Чтобы анализатор показывал сигналы в требуемых точках цепи, следует применить пробник (щуп напряжения). Количество пробников зависит от того, в каких точках схемы необходимо измерить сигнал. В данном примере нам достаточно выполнить измерение на выходе схемы (точка между правой обкладкой конденсатора C1 и верхним выводом резистора R1). Щелчком ЛКМ установить пробник в данной точке схемы.

Чтобы активировать анализатор, нужно выделить щуп напряжения (появится крестик рядом с изображением) и, удерживая ЛКМ, перетащить его на экран анализатора. Если бросить изображение пробника возле левой вертикальной границы экрана анализатора, то это позволит измерять коэффициент передачи (усиления) схемы. Если возле правой, то можно будет измерять сдвиг фазы выходного сигнала по отношению к фазе входного. Так как в этой работе нужны и АЧХ (коэффициент передачи) и ФЧХ (фаза), то выполняем данную процедуру пробником дважды.

И, наконец, чтобы все заработало, необходимо указать анализатору элемент, который будет являться источником сигнала. В нашем случае – это генератор, обозначенный C1(1).

По аналогии со щупом выделяем его (должен появиться крестик) и перетаскиваем выделенное изображение на диаграмму.

Если все сделано правильно, то для запуска режима симуляции достаточно навести курсор на прямоугольник диаграммы и нажать на клавиатуре клавишу «пробел».

Запускается программа симуляции и в установленном частотном диапазоне можно наблюдать результат ее работы. В примере на рисунке 3.7 частотный диапазон составляет 10 Гц – 1 МГц. Этот диапазон можно изменить указания желаемого диапазона в настройках анализатора.

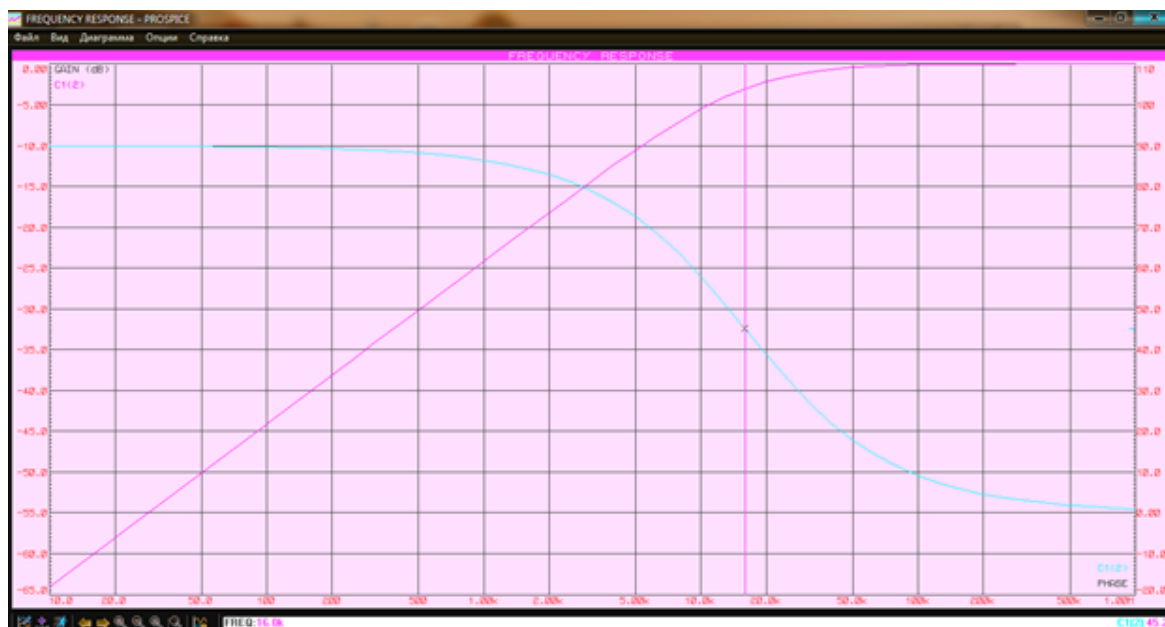


Рисунок 3.7 – Пример построения АЧХ и ФЧХ исследуемой цепи

Данная картинка содержит достаточно полную информацию об АЧХ и ФЧХ цепи. Обратите внимание на вертикальную линию, установленную вручную на значении фазы  $45^\circ$ . Ему соответствует частота 16 кГц, которая в рассматриваемом примере является частотой среза цепи ( $f_0=1/(2\pi RC)$ ). Хорошо видно, что данная цепь представляет собой фильтр верхних частот.

Инструкция по использованию этого инструмента приведена в приложении В.

#### 4. Программа выполнения лабораторной работы

- 4.1. Рассчитать параметры делителя напряжения на резисторах для заданных входного и выходного напряжений и сопротивления нагрузки в соответствии с заданным вариантом (Приложение А).
- 4.2. Составить в среде моделирования Proteus схему делителя с заданными параметрами и экспериментально измерить выходное напряжение делителя.

- 4.3. Исследовать зависимость выходного напряжения делителя при изменении сопротивления нагрузки от максимального значения до 0,1% от  $R_H$ .
- 4.4. Составить в среде моделирования дифференцирующие и интегрирующие  $RC$ -цепи при заданных значениях сопротивления и емкости (Приложение Б).
- 4.5. Исследовать временные диаграммы сигналов на выходах дифференцирующих и интегрирующих цепочек при подачи на вход последовательности прямоугольных импульсов типа меандр с частотой и амплитудой импульсов, заданной соответствующим вариантом (Приложение Б).
- 4.6. Исследовать АЧХ и ФЧХ дифференцирующей и интегрирующей цепей в диапазоне частот от 0 до 1 МГц в линейном и логарифмическом масштабах.

## 5. Содержание отчета

- 5.1. Цель и программа работы.
- 5.2. Расчетные соотношения для исследуемых схем.
- 5.3. Принципиальные электрические схемы исследуемых устройств.
- 5.4. Таблицы и графики экспериментальных исследований.
- 5.5. Выводы по результатам экспериментов.

## 6. Контрольные вопросы

- 6.1. Чем отличаются между собой проводники, диэлектрики и полупроводники?
- 6.2. Объясните, как и почему влияет сопротивление нагрузки на выходное напряжение делителя?
- 6.3. Какими основными параметрами характеризуются типовые пассивные элементы электронных схем (сопротивление, проводимость, емкость и индуктивность) и как они изменяются от геометрических размеров, температуры, частоты сигналов?
- 6.4. Выберите из предлагаемого набора электрических компонентов элементы различных типов и охарактеризуйте их параметры.
- 6.5. Назовите основные параметры импульсов и периодической импульсной последовательности. Покажите, как на практике измерить такие параметры.
- 6.6. Начертите схемы дифференцирующей и интегрирующей цепочек и временные диаграммы изменения сигналов на выходах этих цепочек при подаче на их вход периодической последовательности импульсов.
- 6.7. Как будет изменяться форма импульсов на выходе дифференцирующей цепочки при увеличении емкости конденсатора?
- 6.8. Поясните, как будет изменяться АЧХ интегрирующей цепочки при увеличении емкости конденсатора и с чем это изменение связано.
- 6.9. Каким образом с помощью осциллографа можно измерить амплитуду и частоту импульсной последовательности?
- 6.10. Какими тремя способами в системе Proteus можно измерить напряжение в заданной точке схемы?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шишкин, Г. Г. Электроника: учебник для бакалавров / Г. Г. Шишкин, А. Г. Шишкин. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 703 с. — (Серия: Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-9916-3391-8. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/425494> (дата обращения: 08.04.2019).
2. Бобровников, Л. З. Электроника в 2 ч. Часть 1 : учебник для академического бакалавриата / Л. З. Бобровников. — 6-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 288 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-00109-9. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/book/elektronika-v-2-ch-chast-1-438210> (дата обращения: 08.04.2019).
3. Бобровников, Л. З. Электроника в 2 ч. Часть 2: учебник для академического бакалавриата / Л. З. Бобровников. — 6-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 275 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-00112-9. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/book/elektronika-v-2-ch-chast-2->

438244 (дата обращения: 08.04.2019).

4. Новожилов, О. П. Электроника и схемотехника в 2 т : учебник для академического бакалавриата / О. П. Новожилов. — Москва : Издательство Юрайт, 2015. — 804 с. — (Серия: Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-9916-4182-1. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/book/elektronika-i-shemotehnika-v-2-t-382342> (дата обращения: 08.04.2019).

5. Миленина С.А. Электротехника, электроника и схемотехника: учебник и практикум для академического бакалавриата/С.А. Миленина; под ред. Н.К. Миленина. — М.: Изд-во Юрайт, 2019. — 406 с.

<https://biblio-online.ru/book/elektrotehnika-elektronika-i-shemotehnika-432925>

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

Вариант	Входное Напряжение, В	Выходное напряжение, В	Сопротивление нагрузки, кОм	Примечание
1	6	3	1	
2	9	5	1,2	
3	8	5	1,4	
4	12	8	2	
5	14	9	2,2	
6	15	10	0,8	
7	18	12	1,1	
10	7	5	3	
11	11	6	5	
12	16	12	4	
13	18	10	3,3	
14	20	15	1,7	
15	22	12	2,7	
16	9	6	3,1	
17	12	5	2	
18	15	9	3	
19	11	3	1	
20	13	6	2	
21	17	12	1,6	
22	19	10	2,2	
23	21	17	1,7	
24	16	5	1,4	
25	18	12	2,6	



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Параметры дифференцирующей и интегрирующей цепей

Вариант	Частота импульсов, Гц	Амплитуда импульсов, В	Дифцепочка		Интегрирующая	
			R, кОм	C, пФ	R, кОм	C, нФ
1	1000	2	10	100	100	10
2	1000	4	12	2000	150	8
3	1200	5	15	2000	100	12
4	1500	6	16	1000	51	20
5	10000	3	9,1	80	20	30
6	8000	7	5	150	47	22
7	1000	2	8	120	100	10
10	1000	4	14	2200	150	8
11	1200	5	13	1000	100	12
12	1500	6	16	2000	51	20
13	10000	3	9,1	80	20	30
14	8000	7	5	150	47	22
15	1300	9	18	1500	120	10
16	2500	3	15	3000	33	47
17	1000	2	10	100	100	10
18	1000	4	12	2000	150	8
19	1200	5	15	2000	100	12
20	1500	6	16	1000	51	20
21	10000	3	9,1	80	20	30
22	8000	7	5	150	47	22
23	1000	2	8	120	100	10
24	1000	4	14	2200	150	8
25	1200	5	13	1000	100	12
26	1500	6	16	2000	51	20
27	10000	3	9,1	80	20	30
28	8000	7	5	150	47	22

## ПРИЛОЖЕНИЕ В.

### Краткая инструкция по измерению амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристик в программе Proteus

Для измерения АЧХ и ФЧХ цепи в программе Proteus необходимо использовать следующие инструменты:

- генератор (режим “sine”);
- диаграмма (режим “Frequency”);
- пробник (щуп напряжения).

На первом скриншоте (Рисунок 1) эти инструменты отмечены стрелками.

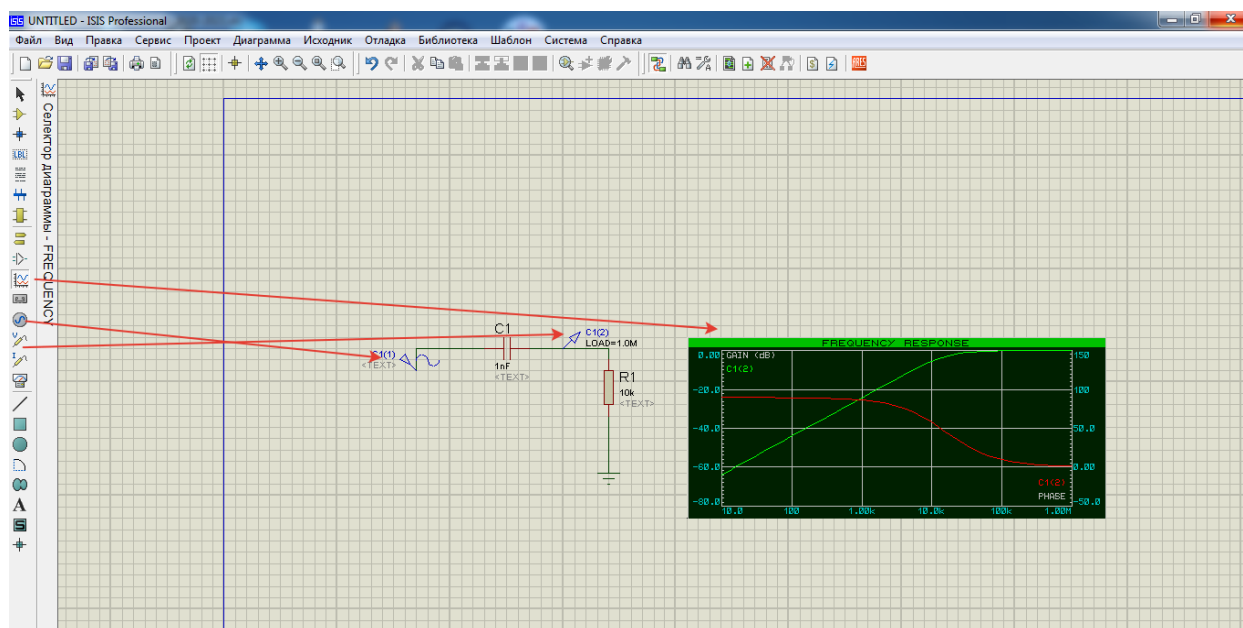


Рисунок 1 – Общий вид рабочего окна программы в режиме измерения АЧХ, ФЧХ

Прежде чем приступить к измерениям, необходимо собрать исследуемую схему, подключив к ее входу генератор (источник сигнала). Его настройки по умолчанию показаны на рисунке 2.

Вместо осциллографа применим графический анализатор (инструмент «Диаграмма» в режиме “Frequency”). Чтобы разместить диаграмму на рабочем столе, выделяем пиктограмму «Диаграмма», задаем режим “Frequency”, наводим курсор в нужное место и, удерживая левую кнопку мышки, перемещаем его в диагональном направлении. Отпускаем левую кнопку и получаем прямоугольник диаграммы, которую надо будет активировать.

Чтобы анализатор показывал сигналы в требуемых точках цепи, применяем пробник (щуп напряжения).

Количество пробников зависит от того, в каких точках схемы необходимо измерить сигнал. В данном примере нам достаточно выполнить измерение на

выходе схемы (точка между правой обкладкой конденсатора C1 и верхним выводом резистора R1). Устанавливаем пробник в данной точке.

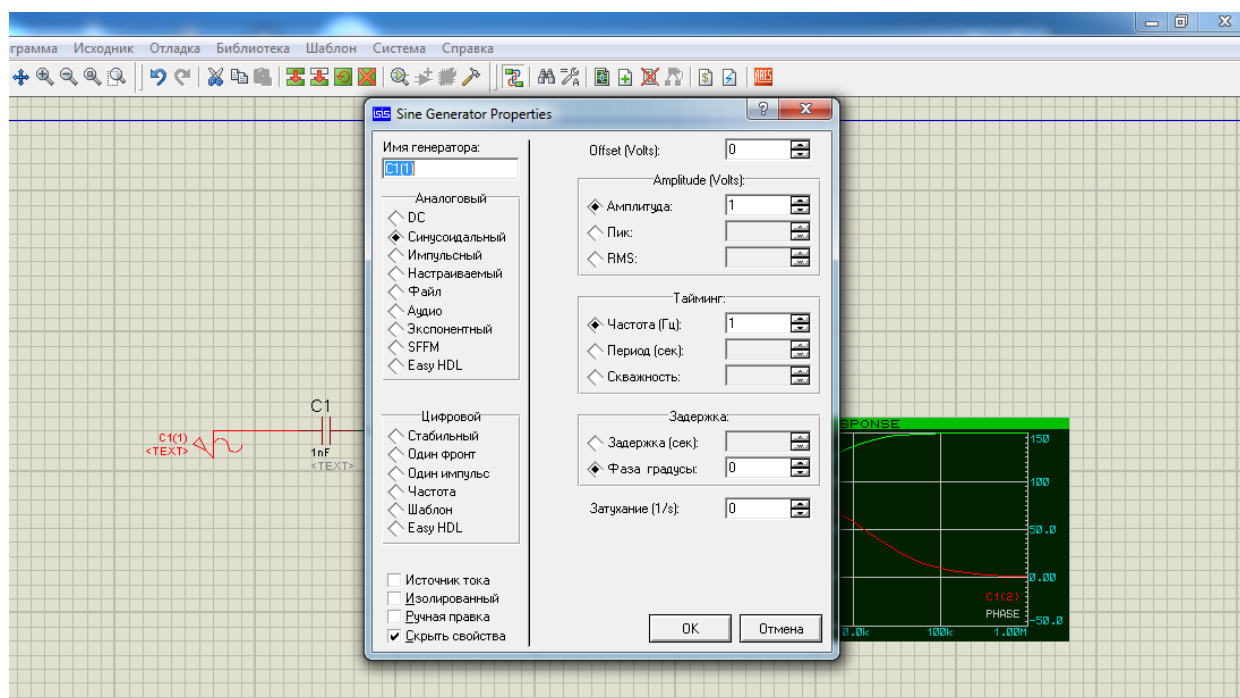


Рис.2 – Стандартные настройки генератора

Чтобы активировать диаграмму, выделяем щуп напряжения (появится крестик рядом с изображением) и, удерживая левую кнопку мышки, перетаскиваем его на подготовленную диаграмму. Если бросить изображение пробника возле левой вертикальной границы диаграммы, то это позволит измерять коэффициент передачи (усиления) схемы. Если возле правой, то можно будет измерять фазу. Так как нам нужны и АЧХ (коэффициент передачи) и ФЧХ (фаза), то выполняем данную процедуру дважды.

И, наконец, чтобы все заработало, нам необходимо указать программе элемент, который будет являться источником сигнала. В нашем случае – это генератор, обозначенный C1(1).

По аналогии со щупом выделяем его (должен появиться крестик) и перетаскиваем выделенное изображение на диаграмму.

Если все сделано правильно, то для запуска режима симуляции достаточно навести курсор на прямоугольник диаграммы и нажать клавишу «пробел».

Запускается программа симуляции и в установленном частотном диапазоне можно наблюдать результат ее работы. В примере на рисунке 3 частотный диапазон составляет 10 Гц – 1 МГц.



Рисунок 3 – Пример построения АЧХ и ФЧХ исследуемой цепи

Данная картинка содержит достаточно полную информацию об АЧХ и ФЧХ цепи. Обратите внимание на вертикальную линию, установленную вручную на значении фазы  $45^\circ$ . Ему соответствует частота 16 кГц, которая в рассматриваемом примере является частотой среза цепи ( $f_0=1/(2\pi RC)$ ). Хорошо видно, что данная цепь представляет собой фильтр верхних частот, так как подавляет низкочастотные составляющие и хорошо пропускает частотные компоненты верхних частот.