

#### 4 Порядок выполнения работы

Будем считать, что ЭДС  $E$  и внутреннее сопротивление источника  $r$  (рис. 1а) являются постоянными величинами. В этом случае внешняя характеристика источника (рис. 2) будет выражаться уравнением прямой линии

$$U_H(I) = E - rI.$$

Режим, при котором ток равен нулю  $I = 0$ , называется режимом холостого хода, в этом случае  $U_H = U_X = E$ . Физически это равносильно отключению нагрузки ( $R_H = \infty$ ).

Режим, при котором напряжение равно нулю  $U_H = 0$ , называется режимом короткого замыкания ( $R_H = 0$ ). В этом случае ток достигает своего максимального значения  $I = I_K = E/r$ .

Если положить внутреннее сопротивление источника равным нулю  $r = 0$ , то нагрузочная характеристика не будет зависеть от тока  $U_H = E$  (рис. 3). В этом случае источник называется идеальным.

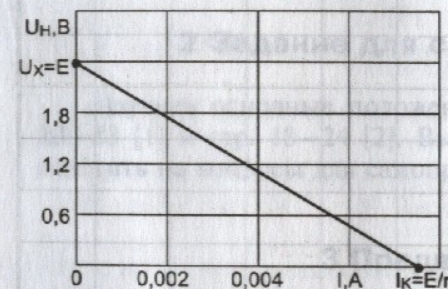


Рис. 2

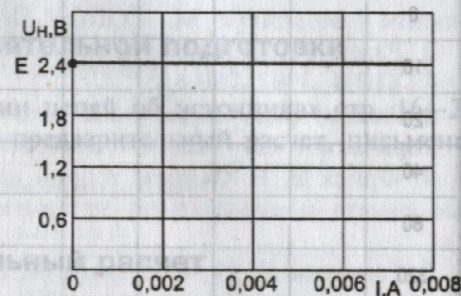


Рис. 3

Из этого можно сделать следующий вывод. В реальном источнике, для которого выполняется неравенство  $r \ll R_H$ , приближенно из схемы можно исключить  $r$ , тогда этот источник по своим свойствам будет приближаться к идеальному источнику ЭДС.

Исследуем с помощью ЭВМ характеристики источника постоянного напряжения.

##### 4.1 Запуск программы схемотехнического моделирования Micro-Cap

Включить ЭВМ и запустить программу Micro-Cap

C:\MC8DEMO\mc8demo.exe

или

ПУСК\Все программы\Micro-Cap Evaluation 8\Micro-Cap Evaluation 8.0.

В появившемся окне Micro-Cap 8.1.0.0 Evaluation Version (рис. 4) собрать схему для исследования источника ЭДС (рис. 1).

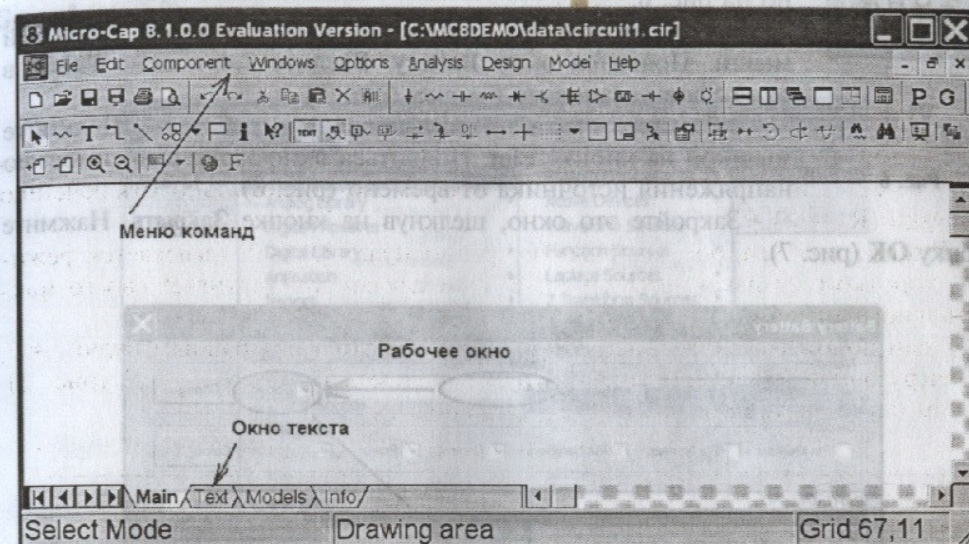


Рис. 4

#### 4.2 Сборка схемы

##### 4.2.1 Ввод источника постоянной ЭДС

Ввести источник постоянной ЭДС (Battery)  $E = 2,4$  В ( $V = 2.4$ ).

Откройте меню Component\Analog Primitives\Waveform Sources и выберите Battery (рис. 5).

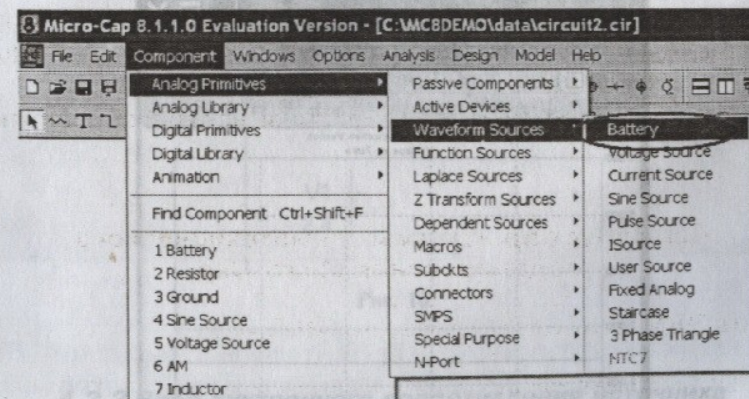
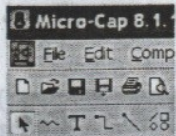


Рис. 5





V1

Рис. 6

Курсор примет форму графического изображения батареи напряжения. Поместите его на рабочее окно, так как показано на рис. 6.

Зафиксируйте это положение, щелкнув левой клавишей мыши. Появится окно **Battery**. Введите **2.4** в окне **Value**, в окне **Show** установите галочку (рис. 7).

Убедитесь, что источник правильно работает. Щелкните мышкой на кнопке **Plot**. Появится окно **Plot** с зависимостью напряжения источника от времени (рис. 8).

Закройте это окно, щелкнув на кнопке **Заккрыть**. Нажмите кнопку **OK** (рис. 7).

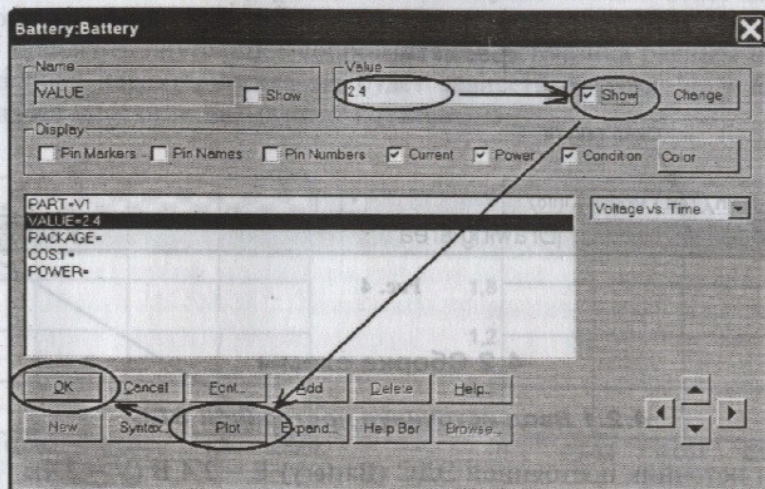


Рис. 7

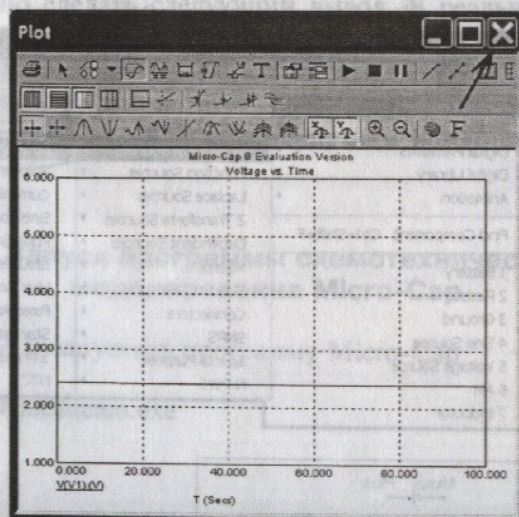


Рис. 8

## 4.2.2 Ввод земли

Откройте меню **Component\Analog Primitives\Connectors** и выберите землю **Ground** (рис. 9).

Установите землю снизу от источника **V1** (рис. 10).

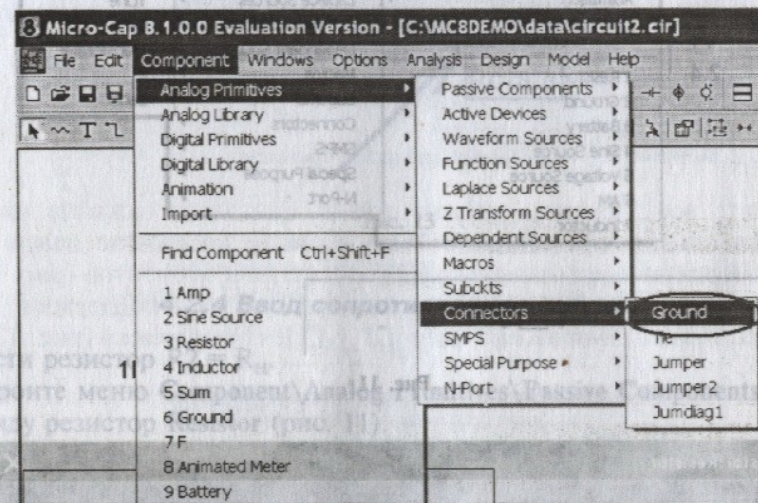


Рис. 9

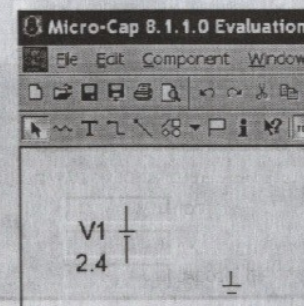


Рис. 10

## 4.2.3 Ввод внутреннего сопротивления источника

Ввести резистор  $R1 = r = 320 \text{ Ом}$ .

Откройте меню **Component\Analog Primitives\Passive Components** и выберите команду резистор **Resistor** (рис. 11).



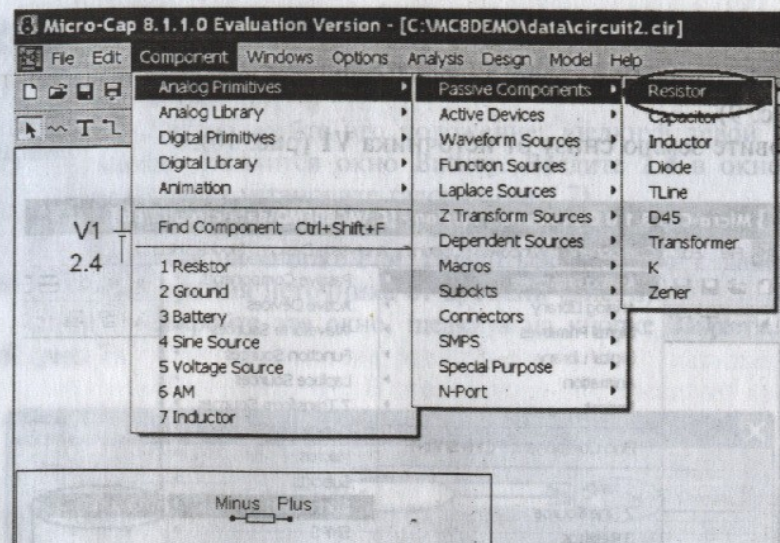


Рис. 11

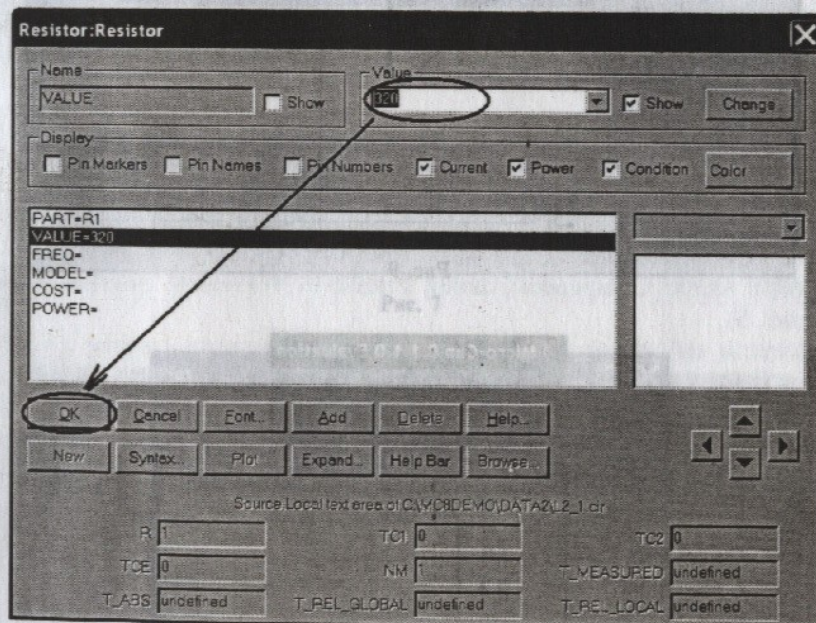


Рис. 12

Курсор примет форму резистора (прямоугольник с выводами). Поместите его на рабочее окно, возле источника и щелкните левой кнопкой мыши. Появится окно Resistor (рис. 12).

В окне Value введите значение сопротивления 320 (320 Ом), нажмите кнопку OK.

Для поворота резистора используйте кнопку Rotate (рис. 13).

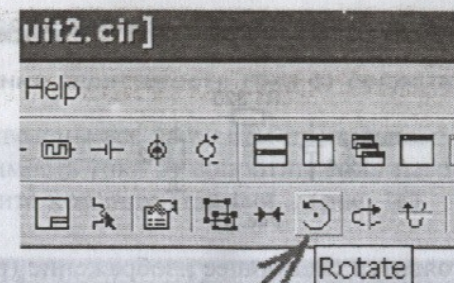


Рис. 13

#### 4.2.4 Ввод сопротивления нагрузки

Ввести резистор  $R_2 = R_H$ .

Откройте меню Component\Analog Primitives\Passive Components и выберите команду резистор Resistor (рис. 11).

Курсор примет форму резистора (прямоугольник с выводами). Поместите его на рабочее окно, возле элемента земля и щелкните левой кнопкой мыши. Появится окно Resistor (рис. 14).

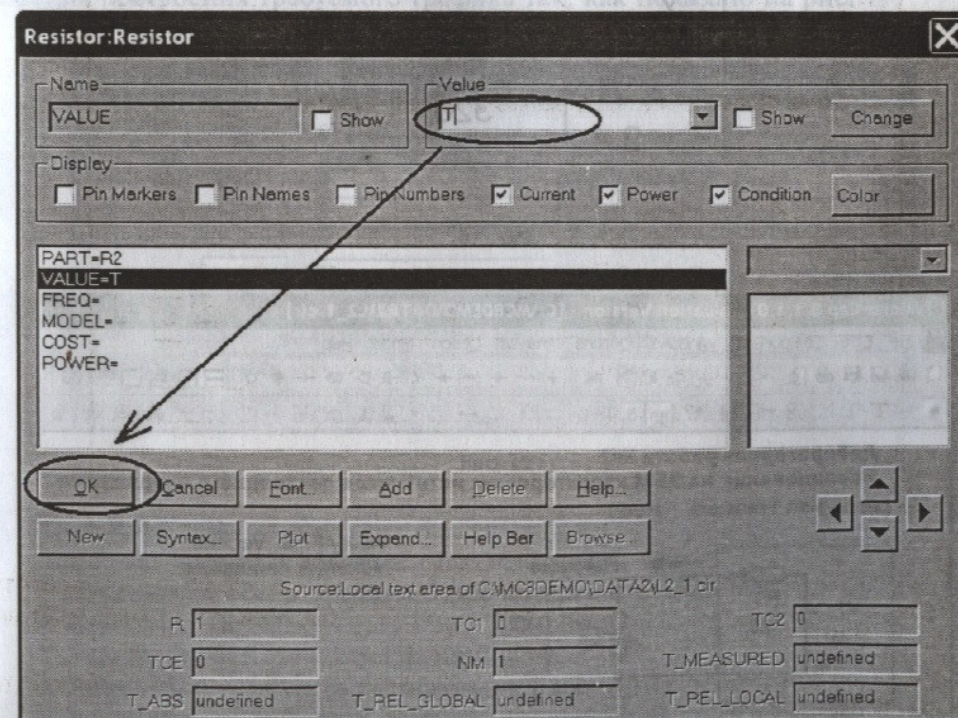


Рис. 14



В окне Value введите переменную времени T (t), нажмите кнопку ОК.

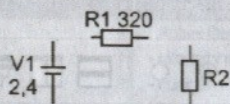


Рис. 15

В окне редактора появится следующее изображение (рис. 15).

#### 4.2.5 Ввод проводников

Соедините все элементы проводниками. Для этого нажмите на кнопку ввода ортогональных проводников Wire Mode и, удерживая левую кнопку мыши, «прочертите» соединяя необходимые полюсы элементов (рис. 16).

В случае возникновения проблем загрузите с сайта поддержки учебного процесса (<http://frisk.newmail.ru/>) файл L2\_1.CIR (File\Open...) (рис. 17).

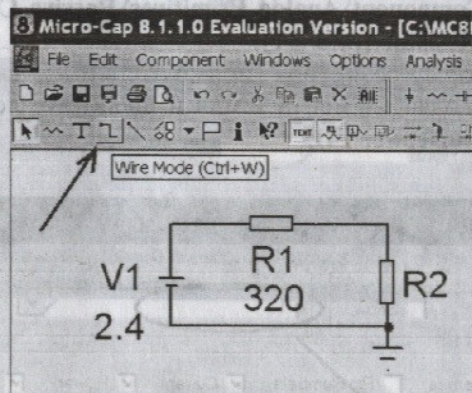


Рис. 16



Рис. 17

### 4.3 Исследование характеристик источника

#### 4.3.1 Построение зависимости тока от сопротивления нагрузки

Убедитесь, что введены все элементы правильно.

Получите зависимость тока от сопротивления нагрузки I(R2). Для этого в меню Analysis выберите команду Transient... (рис. 18).



Рис. 18

На экране появиться окно Transient Analysis Limits, в котором задайте параметры построения требуемого графика так, как показано на рис. 19.

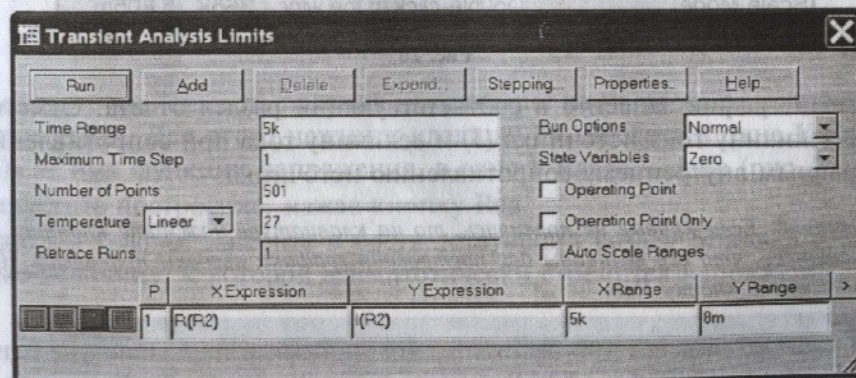


Рис. 19

Time Range «5k» — интервал (0...5 кОм).

Maximum Time Step «1» максимальный шаг (1 Ом).

P номер окна «1», в котором будет построен график тока.

X Expression «R(R2)» — аргументы функции тока.

Y Expression «I(R2)» — имя функции тока.

X Range «5k» — интервал отображения аргумента по оси X.

Y Range «8m» — интервал отображения функции по оси Y.

Запустите построение, нажав кнопку Run.



На экране появятся графики зависимости тока от сопротивления нагрузки  $I(R2)$  (рис. 20).

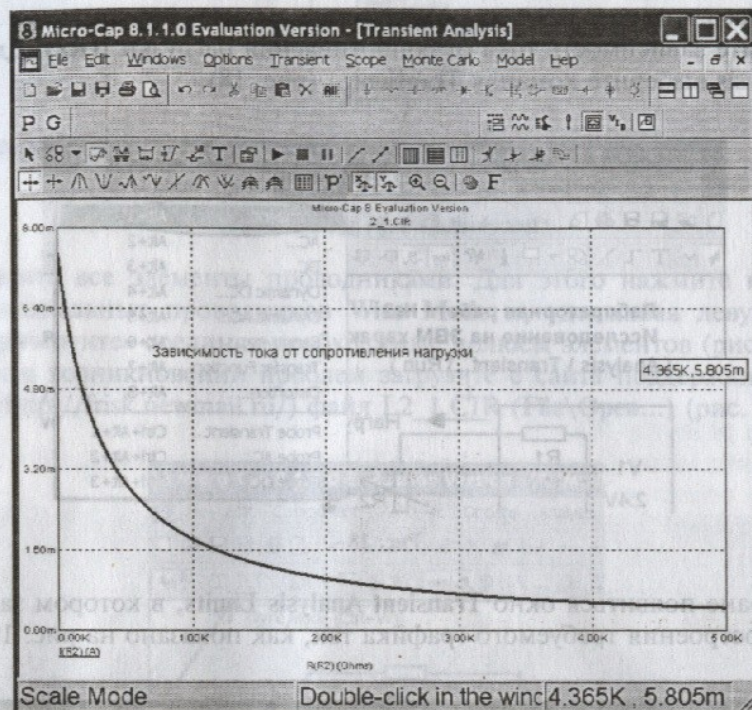


Рис. 20

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на графике величину тока источника (J) и величину тока при сопротивлении нагрузки равным внутреннему сопротивлению источника.

**Замечание.** Если кривые не появились, то на клавиатуре нажмите клавишу F9 и убедитесь, что все величины для построения графика введены правильно. Нажмите вновь кнопку Run.

Для точного определения величины тока нажмите на клавиатуре одновременно клавиши <Shift+Ctrl+X>. В появившейся форме Go To X введите величину сопротивления, например, 320 (рис. 21).

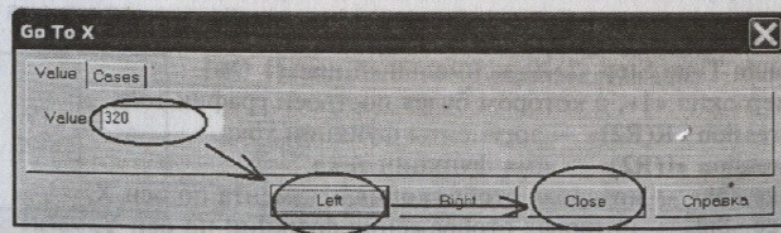
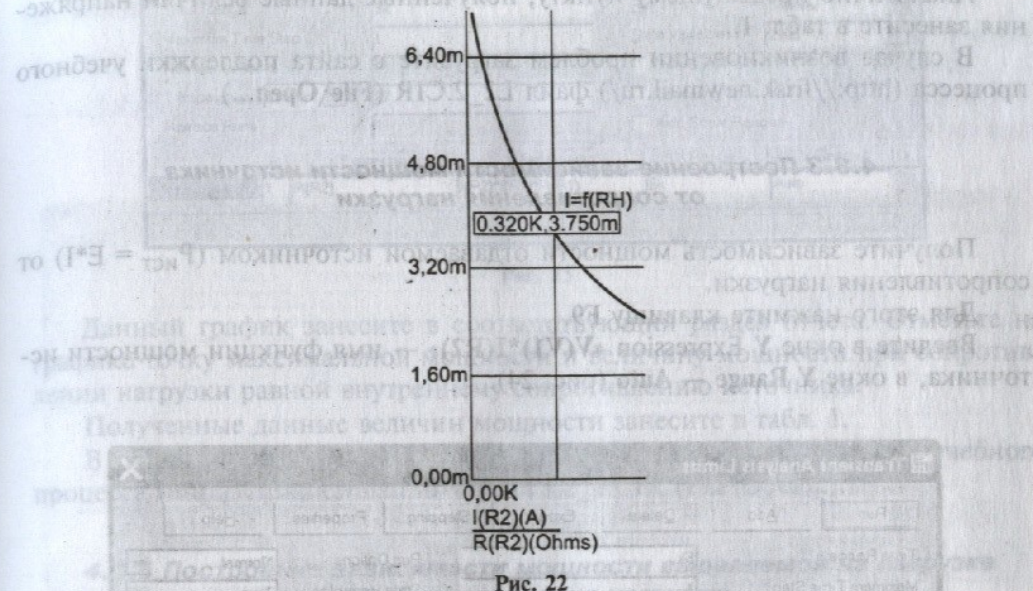


Рис. 21

Нажмите клавишу Left и затем Close. На графике должны появиться координаты запрашиваемой точки (рис. 22).



Полученные данные величин тока занесите в табл. 1.

#### 4.3.2 Построение зависимости напряжения от сопротивления нагрузки

Получите зависимость падения напряжения на нагрузке от сопротивления нагрузки  $V(R2)$ . Для этого нажмите клавишу F9. Введите в окне Y Expression «V(R2)» — имя функции напряжения, в окне Y Range — Auto (рис. 23).

Запустите построение, нажав кнопку Run.

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на графике величину, к которой асимптотически стремится напряжение, и вели-

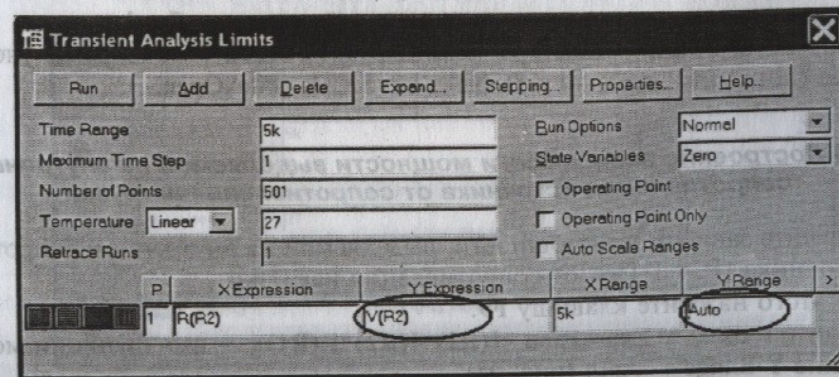


Рис. 23



чину напряжения при сопротивлении нагрузки равной внутреннему сопротивлению источника.

Аналогично предыдущему пункту, полученные данные величин напряжения занесите в табл. 1.

В случае возникновения проблем загрузите с сайта поддержки учебного процесса (<http://frisk.newmail.ru/>) файл L2\_2.CIR (File\Open...).

#### 4.3.3 Построение зависимости мощности источника от сопротивления нагрузки

Получите зависимость мощности отдаваемой источником ( $P_{\text{ист}} = E \cdot I$ ) от сопротивления нагрузки.

Для этого нажмите клавишу F9.

Введите в окне Y Expression « $V(V1) \cdot I(R2)$ » — имя функции мощности источника, в окне Y Range — Auto (рис. 24).

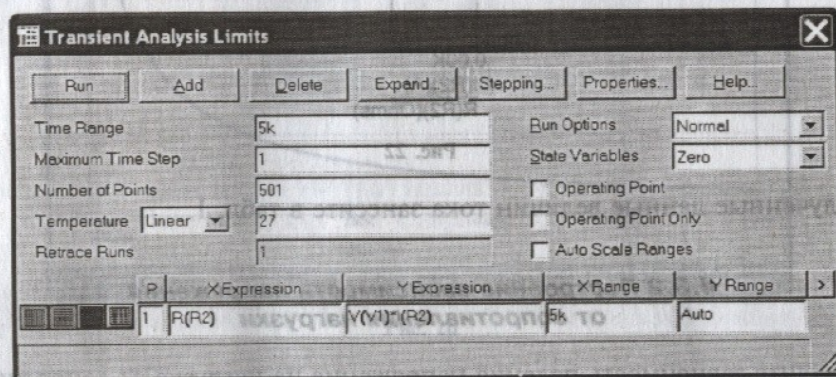


Рис. 24

Запустите построение, нажав кнопку Run.

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на графике точку максимальной мощности и величину мощности при сопротивлении нагрузки равной внутреннему сопротивлению источника.

Полученные данные величин мощности занесите в табл. 1.

В случае возникновения проблем загрузите с сайта поддержки учебного процесса (<http://frisk.newmail.ru/>) файл L2\_3.CIR (File\Open...).

#### 4.3.4 Построение зависимости мощности выделяемой на внутреннем сопротивлении источника от сопротивления нагрузки

Получите зависимость мощности, выделяемой на внутреннем сопротивлении источника ( $P_r = I^2 \cdot r$ ), от сопротивления нагрузки.

Для этого нажмите клавишу F9.

Введите в окне Y Expression « $I(R2)^2 \cdot I(R2) \cdot R(R1)$ » — имя функции мощности, в окне Y Range — Auto (рис. 25).

Запустите построение, нажав кнопку Run.

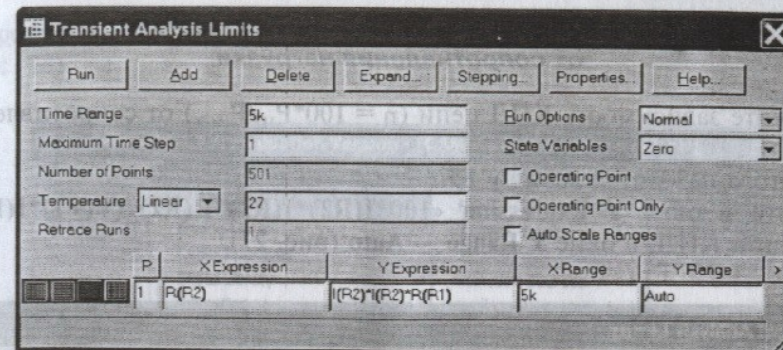


Рис. 25

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на графике точку максимальной мощности и величину мощности при сопротивлении нагрузки равной внутреннему сопротивлению источника.

Полученные данные величин мощности занесите в табл. 1.

В случае возникновения проблем загрузите с сайта поддержки учебного процесса (<http://frisk.newmail.ru/>) файл L2\_4.CIR (File\Open...).

#### 4.3.5 Построение зависимости мощности выделяемой на нагрузке от сопротивления нагрузки

Получите зависимость мощности, выделяемой на нагрузке ( $P_H = I^2 \cdot R_H$ ), от сопротивления нагрузки.

Для этого нажмите клавишу F9.

Введите в окне Y Expression « $I(R2)^2 \cdot I(R2) \cdot R(R2)$ » — имя функции мощности, в окне Y Range — Auto (рис. 26).

Запустите построение, нажав кнопку Run.

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на графике точку максимальной мощности.

Полученные данные величин мощности занесите в табл. 1.

В случае возникновения проблем загрузите с сайта поддержки учебного процесса (<http://frisk.newmail.ru/>) файл L2\_5.CIR (File\Open...).

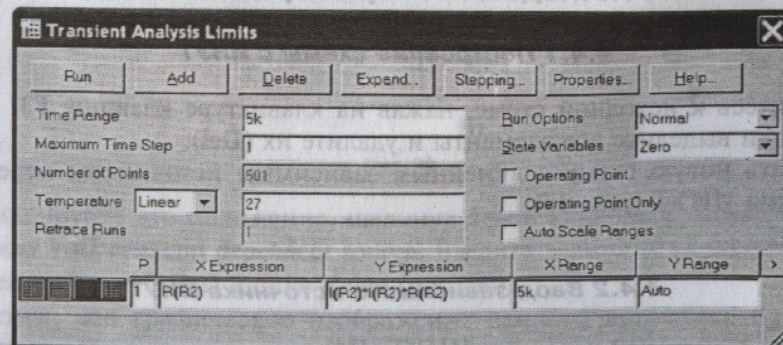


Рис. 26



Таблица 2

Получено экспериментально		Рассчитано по экспериментальным данным	
$I =$	A,	$I =$	A,
$U_E =$	B,	$U_E =$	B,
$U_{R1} =$	B,	$U_{R1} =$	B,
$U_{R2} =$	B,	$U_{R2} =$	B,
N	$V_N, B$	$V_N, B$	
0	0	0	
1			
2			
3	0	0	

## 5 Обработка результатов машинного эксперимента

Сравнить полученные графики и данные с графиками и данными, полученными в предварительном расчете. Сделать выводы.

## 6 Вопросы для самопроверки

1. Покажите способы включения вольтметра и амперметра для измерения. Приведите примеры.
2. Что называется электрическим потенциалом?
3. Сформулируйте обобщенный закон Ома для постоянного тока.
4. Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи.
5. Что называется падением и подъемом напряжения?

## 7 Содержание отчета

Отчет оформляется в формате MS Word. Шрифт Times New Roman 14, полуторный интервал.

Для защиты лабораторной работы отчет должен содержать следующий материал: титульный лист; цель работы; результаты машинного эксперимента; графики исследуемых зависимостей; выводы. К отчету должны быть приложены в напечатанном виде вопросы для самопроверки и ответы на них.

## 8 Литература

1. Фриск В. В. Основы теории цепей. М.: РадиоСофт, 2002. 288 с.
2. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1969. 424 с.

## Лабораторная работа № 5

### Исследование входных частотных характеристик в RC-цепи

#### 1 Цель работы

С помощью программы Micro-Cap исследовать входные амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики RC-цепи. Сравнить АЧХ и ФЧХ, полученные с помощью программы Micro-Cap, с аналогичными характеристиками, полученными расчетным путем.

#### 2 Задание для самостоятельной подготовки

Изучить основные положения ОТЦ о частотных характеристиках электрических цепей стр. 68—75, 84—86 [1] и стр. 112—113 [2]. Выполнить предварительный расчет, письменно ответить на вопросы для самопроверки.

#### 3 Предварительный расчет

3.1. Рассчитать граничную частоту  $f_{гр}$  для RC-цепи (рис. 1), если  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ , а  $C_1 = 219 \text{ нФ}$ .

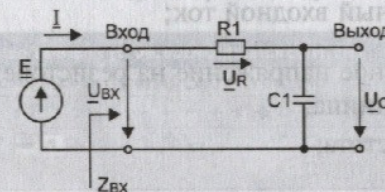


Рис. 1

3.2. Рассчитать для RC-цепи (рис. 1) отношение  $f/f_{гр}$ , значения емкостного сопротивления  $X_C$ , модули входного сопротивления  $Z_{вх}$ , аргумента входного сопротивления  $\varphi_Z$ , модули тока в цепи  $I$ , падения напряжения на резисторе  $U_R$  и модули напряжения на конденсаторе  $U_C$ , на частотах  $f = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 \text{ кГц}$ ,  $E = 0,9 \text{ В}$ . Результаты расчетов занести в таблицу 1.

3.3. Построить в масштабе графики  $Z_{вх}(f)$ ,  $\varphi_Z(f)$ ,  $X_C(f)$ ,  $I(f)$ ,  $U_R(f)$  и  $U_C(f)$  в диапазоне частот  $f \in [2...14] \text{ кГц}$ .

Полученные графики занести в соответствующий раздел отчета.



Таблица 1

По предварительному расчету							Получено экспериментально						
f, кГц	f/f <sub>гр</sub>	X <sub>c</sub> , Ом	Z <sub>вх</sub> , Ом	φ <sub>z</sub> (f), град.	I, мА	U <sub>н</sub> , В	U <sub>c</sub> , В	X <sub>c</sub> , Ом	Z <sub>вх</sub> , Ом	φ <sub>z</sub> (f), град.	I, мА	U <sub>н</sub> , В	U <sub>c</sub> , В
4													
6													
8													
10													
12													
14													

3.4. Рассчитать для нагруженной RC-цепи (рис. 26) частоту  $f_m$  при которой фаза  $\varphi_m$  входного сопротивления имеет минимум. Результаты расчетов занести в таблицу 2.

Таблица 2

Нагруженная RC-цепь	По предварительному расчету	ЭВМ
(Гц) $f_m =$		
$\varphi_m^0 =$		

#### 4 Порядок выполнения работы

Комплексное входное сопротивление находится косвенным методом, путем деления комплексного входного напряжения  $\underline{U}_{вх}$  на комплексный входной ток  $\underline{I}$ . С помощью программы Micro-Cap рассчитывается модуль и фаза входного сопротивления

$$\underline{Z}_{вх} = \frac{\underline{U}_{вх}}{\underline{I}} = Z(\omega)e^{j\varphi_z(\omega)} = Z(2\pi f)e^{j\varphi_z(2\pi f)},$$

где  $\underline{U}_{вх}$  — комплексное входное напряжение;

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_{вх}}{\underline{Z}_{вх}} \text{ — комплексный входной ток;}$$

$$\underline{U}_R = R\underline{I} \text{ — комплексное напряжение на резисторе;}$$

$$j = \sqrt{-1} \text{ — мнимая единица;}$$

$$\omega = 2\pi f \text{ — угловая частота;}$$

$$f \text{ — частота;}$$

$$|Z_{вх}| = Z(2\pi f) \text{ — модуль комплексного входного сопротивления (АЧХ);}$$

$$\arg(Z_{вх}) = \varphi_z(2\pi f) \text{ — аргумент (фаза) комплексного входного сопротивления (ФЧХ).}$$

С другой стороны, входное сопротивление это сопротивление со стороны входных зажимов

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{вх} &= \operatorname{Re}(\underline{Z}_{вх}) + j\operatorname{Im}(\underline{Z}_{вх}) = R_1 - jX_C = \sqrt{R_1^2 + X_C^2} \cdot e^{-j\arctg\left(\frac{X_C}{R_1}\right)} = \\ &= R_1 \sqrt{1 + \left(\frac{f_{гр}}{f}\right)^2} \cdot e^{-j\arctg\left(\frac{f_{гр}}{f}\right)}, \end{aligned}$$

где  $\operatorname{Re}(\underline{Z}_{вх}) = R_1$  — резистивное входное сопротивление (рано сопротивлению резистора  $R_1$ );

$\operatorname{Im}(\underline{Z}_{вх}) = -X_C$  — реактивное входное сопротивление;

$X_C = \frac{1}{\omega C_1}$  — реактивное сопротивление конденсатора  $C_1$ ;

$f_{гр} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$  — граничная частота RC-цепи.

Для нагруженной RC-цепи

$$f_m = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \sqrt{1 + \frac{R_2}{R_1}}, \quad \varphi_m^0 = \frac{180^\circ}{\pi} \arctg \frac{1}{2\sqrt{\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 + \frac{R_1}{R_2}}},$$

где  $R_2 = 320 \text{ Ом}$  — сопротивление нагрузки.

Исследуем входные частотные характеристики RC-цепи (рис. 1).

#### 4.1 Запуск программы схемотехнического моделирования Micro-Cap

Включить ЭВМ и запустить программу Micro-Cap

C:\MC8DEMO\mc8demo.exe

или

ПУСК\Все программы\Micro-Cap Evaluation 8\Micro-Cap Evaluation 8.0.

В появившемся окне Micro-Cap 8.1.0.0 Evaluation Version (рис. 2) собрать схему для измерения частотных характеристик (рис. 1).

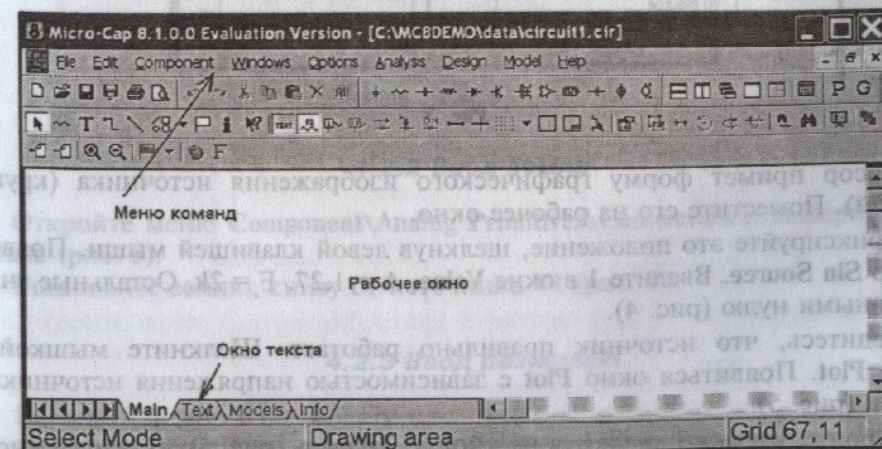


Рис. 2



## 4.2 Сборка RC-цепи для измерения входного сопротивления

Собрать схему с источником синусоидального напряжения, резистором и конденсатором (рис. 1).

### 4.2.1 Ввод источника синусоидального напряжения

Ввести источник V1 синусоидального напряжения (Sin Source) с амплитудой

$$U_m = E \sqrt{2} = 0,9 \sqrt{2} = 1,27 \text{ В (A = 1.27V)},$$

частотой

$$f = 2 \text{ кГц (F = 2k)}.$$

Откройте меню Component\Analog Primitives\Waveform Sources и выберите Sin Source (рис. 3).

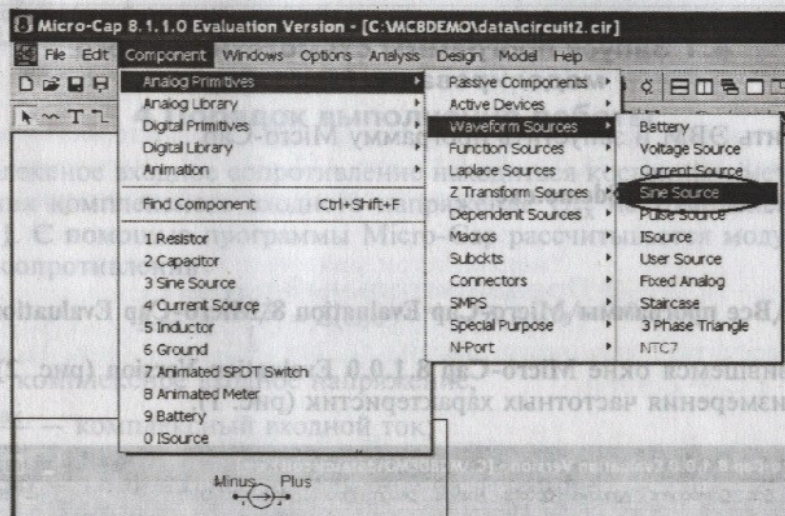


Рис. 3

Курсор примет форму графического изображения источника (круг со стрелкой). Поместите его на рабочее окно.

Зафиксируйте это положение, щелкнув левой клавишей мыши. Появится окно Sin Source. Введите 1 в окне Value, A = 1.27, F = 2k. Остальные значения равными нулю (рис. 4).

Убедитесь, что источник правильно работает. Щелкните мышкой на кнопке Plot. Появится окно Plot с зависимостью напряжения источника от времени (рис. 5).

Закройте это окно, щелкнув на кнопке Закрыть (рис. 5). Нажмите кнопку OK (рис. 4).

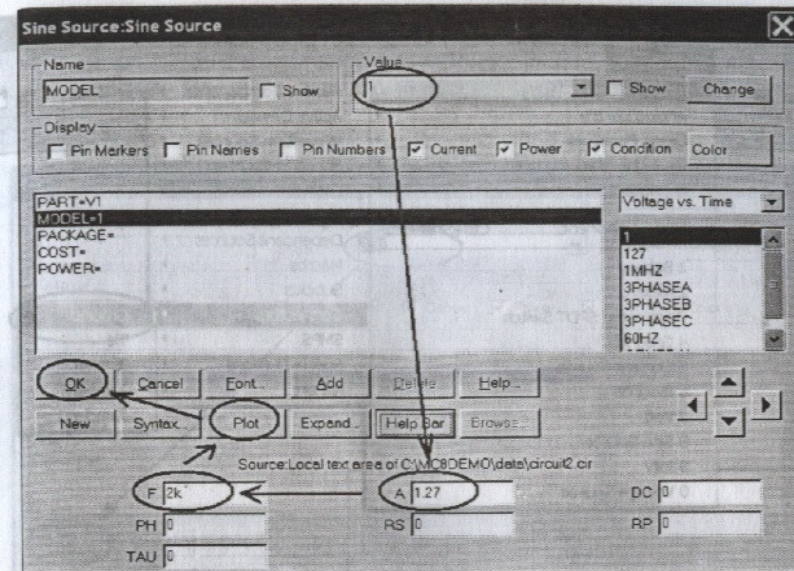


Рис. 4

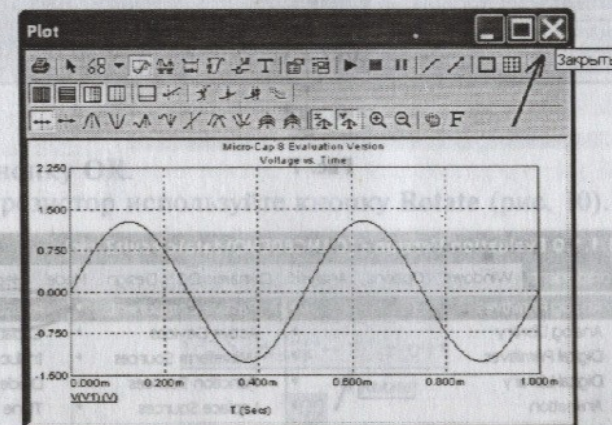


Рис. 5

### 4.2.2 Ввод земли

Откройте меню Component\Analog Primitives\Connectors и выберите землю Ground (рис. 6).

Установите землю, снизу от источника V1 (рис. 7).

### 4.2.3 Ввод резистора

Ввести резистор R1 = 100 Ом.

Откройте меню Component\Analog Primitives\Passive Components и выберите команду резистор Resistor (рис. 8).



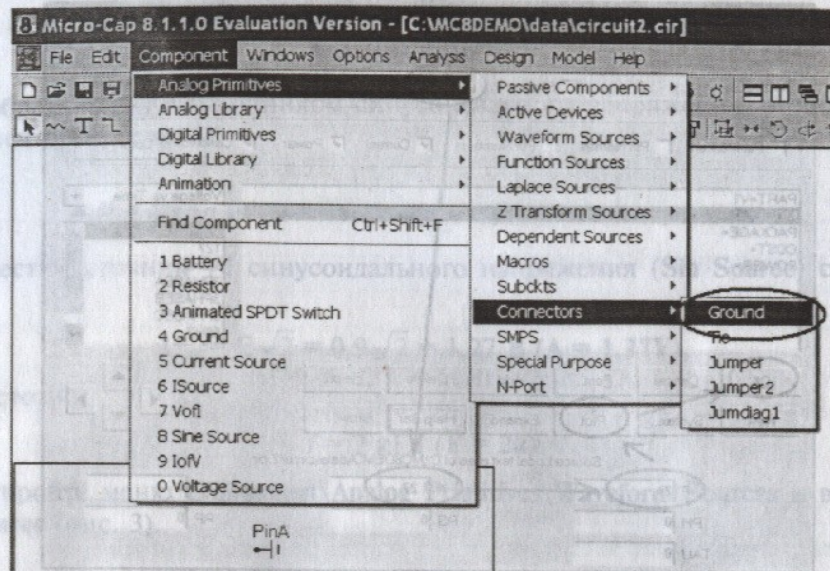


Рис. 6

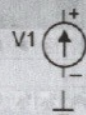


Рис. 7

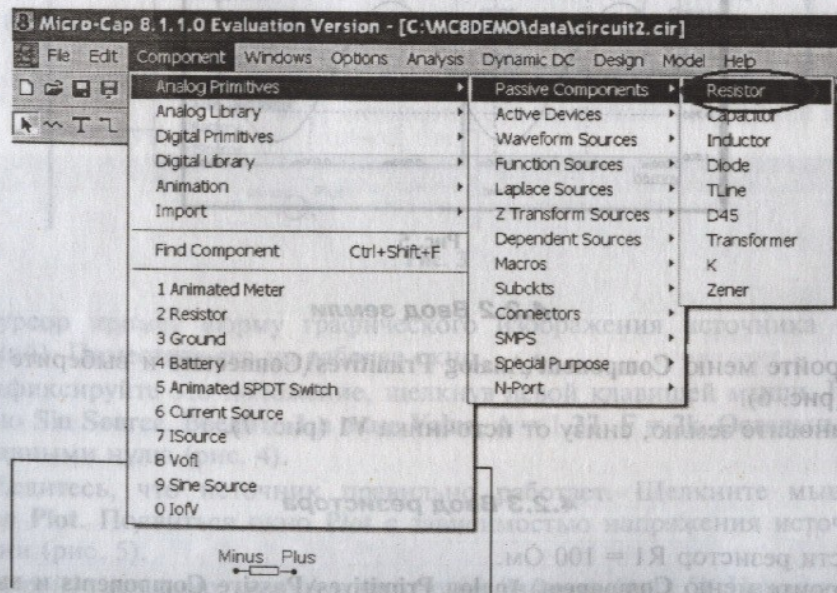


Рис. 8

Курсор примет форму резистора (прямоугольник с выводами). Поместите его на рабочее окно, возле источника и щелкните левой кнопкой мыши. Появится окно **Resistor**. Введите значение сопротивления резистора **100** в окне **Value** (рис. 9).

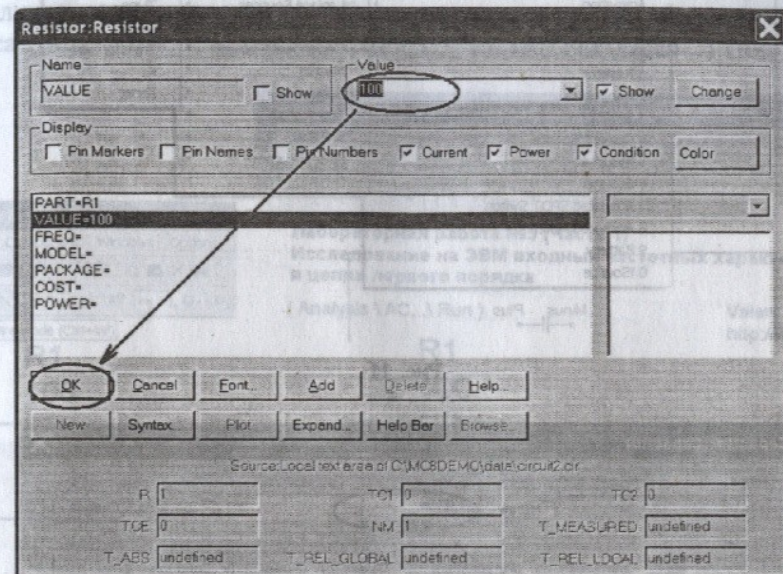


Рис. 9

Нажмите кнопку **OK**. Поверните резистор используйте кнопку **Rotate** (рис. 10).

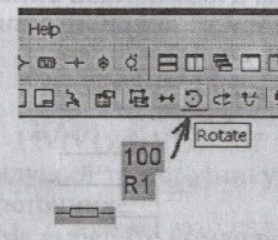


Рис. 10

#### 4.2.4 Ввод конденсатора

Ввести конденсатор  $C1 = 219 \text{ нФ}$  ( $219\text{n}$ ).

Откройте меню **Component\Analog Primitives\Passive Components** и выберите команду резистор **Capacitor** (рис. 11).

Курсор примет форму прибора (две параллельные линии с двумя выводами). Поместите его на рабочее окно, правее резистора и щелкните левой кнопкой мыши. Появится окно **Capacitor**. Введите значение емкости **219n** в окне **Value** (рис. 12).



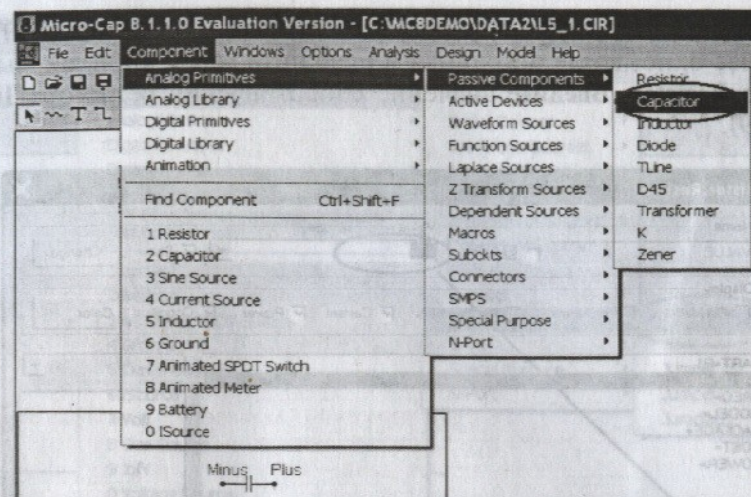


Рис. 11

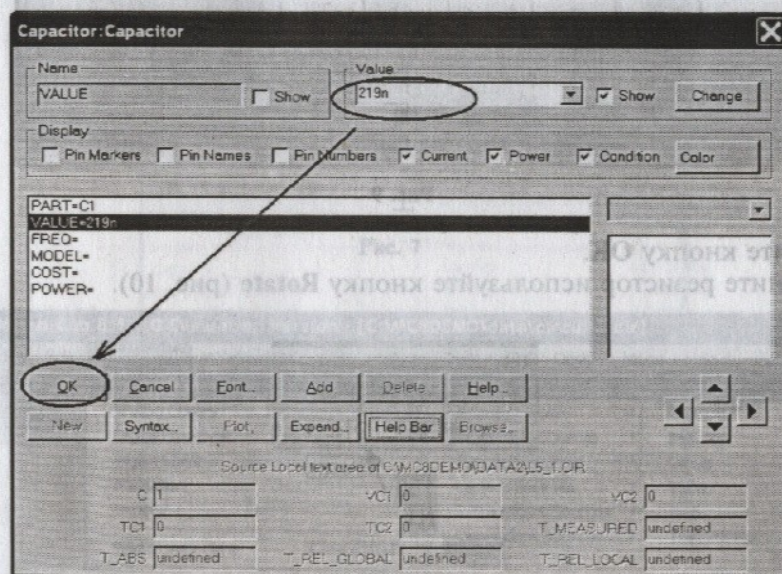


Рис. 12

Нажмите кнопку ОК.

В окне редактора появится следующее изображение (рис. 13).

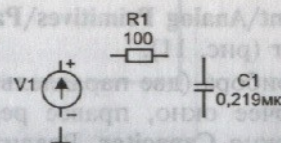


Рис. 13

#### 4.2.5 Ввод проводников

Соедините все элементы проводниками. Для этого нажмите на кнопку ввода ортогональных проводников **Wire Mode** и удерживая левую кнопку мыши «прочертите» соединяя необходимые полюсы элементов (рис. 14).

В случае возникновения проблем загрузите с сайта поддержки учебного процесса (<http://frisk.newmail.ru/>) файл L5\_1.CIR (File\Open...) (рис. 15).

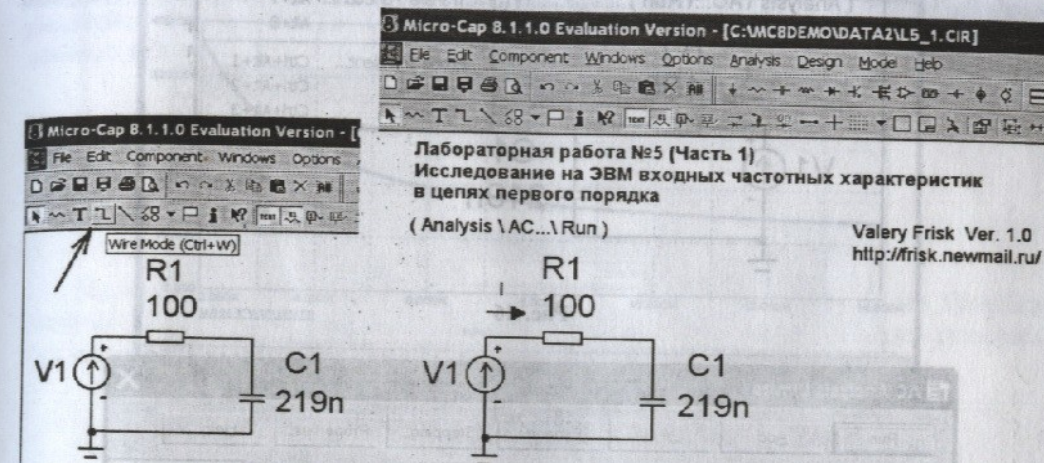


Рис. 14

Рис. 15

#### 4.3 Исследование частотных характеристик RC-цепи

##### 4.3.1 Построение зависимости модуля входного сопротивления от частоты

Убедитесь, что введены все элементы правильно.

Получите зависимость модуля входного сопротивления

$|Z_{вх}| = |U_{вх}/I|$  ( $MAG(-1*V(V1)/I(V1))$ ) от частоты. Здесь присутствует умножение на  $-1$ , так как идущий то источнику ток не совпадает с направлением напряжения на этом источнике.

Для этого в меню **Analysis** выберите команду **AC...** (рис. 16).

На экране появиться окно **Transient Analysis Limits**, в котором задайте параметры построения требуемого графика, так как показано на рис. 17.

**Frequency Range** «Linear», «14k,2k» — линейный интервал частот (2...14 кГц).

**Number of Points** «501» количество точек (501).

**P** номер окна «1» в котором будет построен график тока.

**X Expression** «f» — аргументы функции.

**Y Expression** « $MAG(-1*V(V1)/I(V1))$ » — формула расчета модуля входного сопротивления.

**X Range** «14k,2k,1k» — интервал отображения аргумента по оси X и шаг (2...14 кГц с шагом 1 кГц).



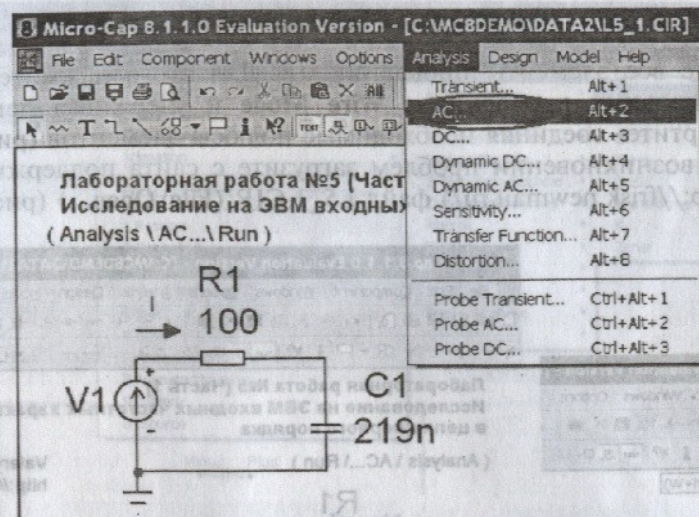


Рис. 16

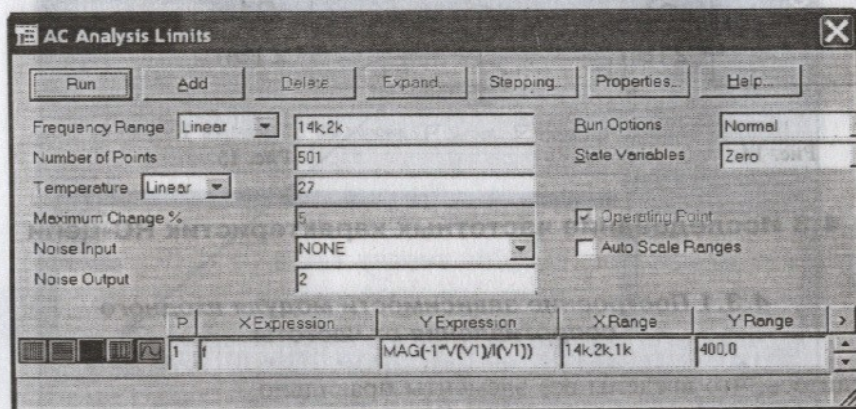


Рис. 17

Y Range «400,0» — интервал отображения функции по оси Y (0...400 Ом). Запустите построение, нажав кнопку Run.

На экране появятся графики зависимости модуля входного сопротивления от частоты (рис. 18).

**Замечание.** Если кривая не появилась, то на клавиатуре нажмите клавишу F9 и убедитесь, что все величины для построения графика введены правильно. Нажмите вновь кнопку Run.

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на графике величину модуля входного сопротивления при  $f = f_{гр}$ .

Для точного определения величины модуля входного сопротивления от частоты на клавиатуре нажмите одновременно клавиши <Shift+Ctrl+X>. В появившейся форме Go To X введите величину частоты, например, 2k (2 кГц) (рис. 19).

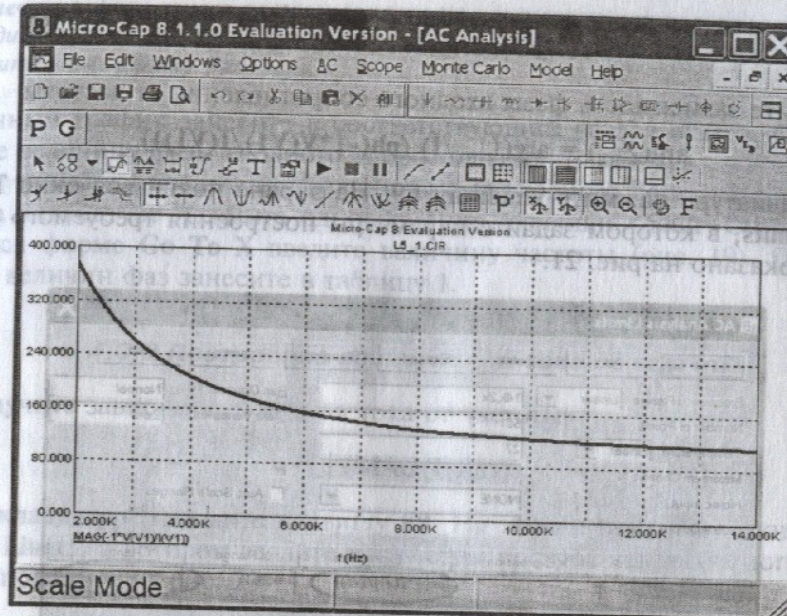


Рис. 18

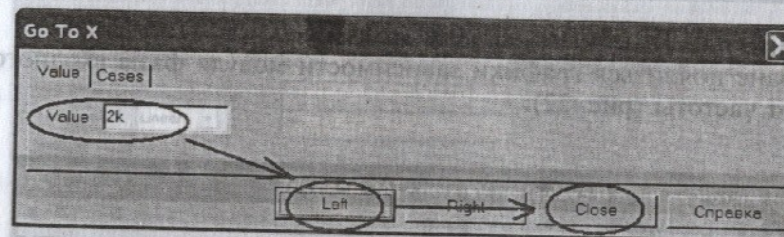


Рис. 19

Нажмите клавишу Left и затем Close. На графике появятся координаты запрашиваемой точки (рис. 20).

Полученные данные величин модуля входного сопротивления от частоты занесите в таблицу I.

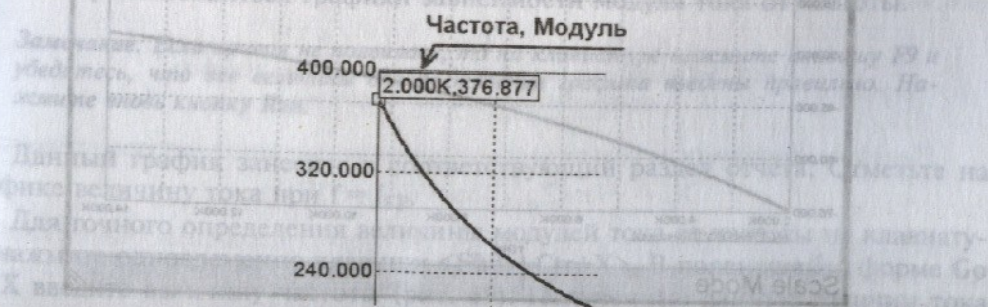


Рис. 20



### 4.3.2 Построение зависимости фазы входного сопротивления от частоты

Получите зависимость фазы входного сопротивления от частоты

$$\arg(Z_{BX}) = \arg(U_{BX}/I) (\text{ph}(-1 \cdot V(V1)/I(V1))).$$

На клавиатуре нажмите клавишу F9. На экране появиться окно **Transient Analysis Limits**, в котором задайте параметры построения требуемого графика так, как показано на рис. 21.

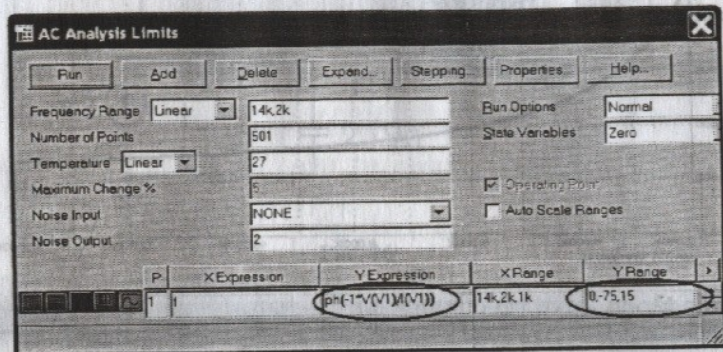


Рис. 21

Запустите построение, нажав кнопку **Run**.

На экране появиться графики зависимости модуля фазы входного сопротивления от частоты (рис. 22).

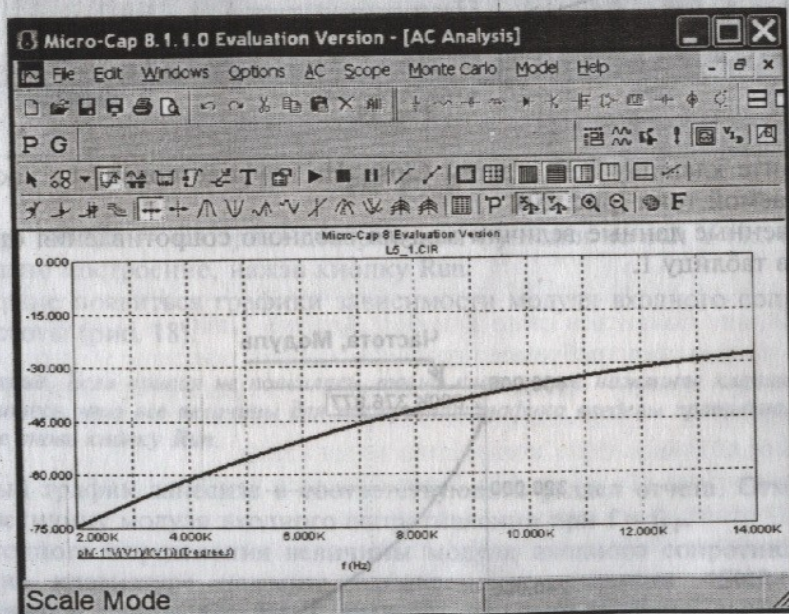


Рис. 22

**Замечание.** Если кривая не появилась, то на клавиатуре нажмите клавишу F9 и убедитесь, что все величины для построения графика введены правильно. Нажмите вновь кнопку **Run**.

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на графике величину фазы входного сопротивления при  $f = f_{гр}$ .

Для точного определения величины фаз входного сопротивления от частоты на клавиатуре нажмите одновременно клавиши <Shift+Ctrl+X>. В появившейся форме **Go To X** введите величину частоты (рис. 19). Полученные данные величин фаз занесите в таблицу 1.

### 4.3.3 Построение зависимости тока от частоты

Получите зависимость модуля тока от частоты

$$|I| (\text{MAG}(I(R1))).$$

На клавиатуре нажмите клавишу F9. На экране появиться окно **Transient Analysis Limits**, в котором задайте параметры построения требуемого графика, так как показано на рис. 23.

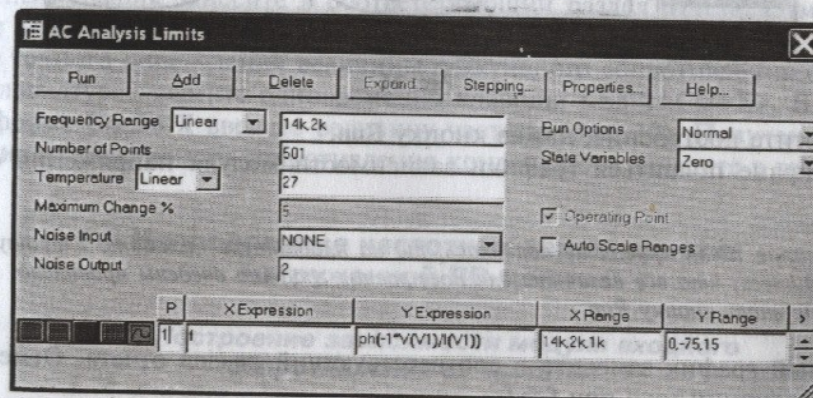


Рис. 23

Запустите построение, нажав кнопку **Run**.

На экране появиться графики зависимости модуля тока от частоты.

**Замечание.** Если кривая не появилась, то на клавиатуре нажмите клавишу F9 и убедитесь, что все величины для построения графика введены правильно. Нажмите вновь кнопку **Run**.

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на графике величину тока при  $f = f_{гр}$ .

Для точного определения величины модулей тока от частоты на клавиатуре нажмите одновременно клавиши <Shift+Ctrl+X>. В появившейся форме **Go To X** введите величину частоты (рис. 19). Полученные данные величин тока занесите в таблицу 1.



#### 4.3.4 Построение зависимости напряжения на резисторе от частоты

Получите зависимость модуля напряжения на резисторе от частоты

$$|U_R| \text{ (MAG(V(R1)))}$$

На клавиатуре нажмите клавишу F9. На экране появится окно **Transient Analysis Limits**, в котором задайте параметры построения требуемого графика так, как показано на рис. 24.

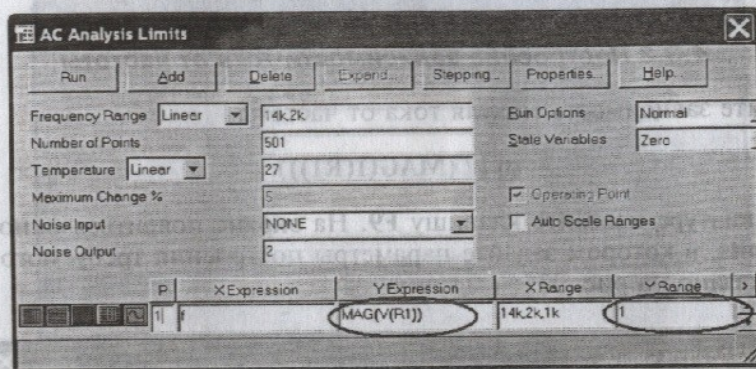


Рис. 24

Запустите построение, нажав кнопку **Run**.

На экране появятся графики зависимости модуля напряжения от частоты.

**Замечание.** Если кривая не появилась, то на клавиатуре нажмите клавишу F9 и убедитесь, что все величины для построения графика введены правильно. Нажмите вновь кнопку **Run**.

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на графике величину тока при  $f = f_{гр}$ .

Для точного определения величины модулей напряжения от частоты на клавиатуре нажмите одновременно клавиши <Shift+Ctrl+X>. В появившейся форме **Go To X** введите величину частоты (рис. 19). Полученные данные величин тока занесите в таблицу 1.

#### 4.3.5 Построение зависимости реактивного сопротивления от частоты

Получите зависимость реактивного сопротивления конденсатора от частоты

$$X_C = -\text{Im}(Z_{BX}) \text{ (Im(V(V1))/I(V1))}$$

На клавиатуре нажмите клавишу F9. На экране появится окно **Transient Analysis Limits**, в котором задайте параметры построения требуемого графика так, как показано на рис. 25.

Запустите построение, нажав кнопку **Run**.

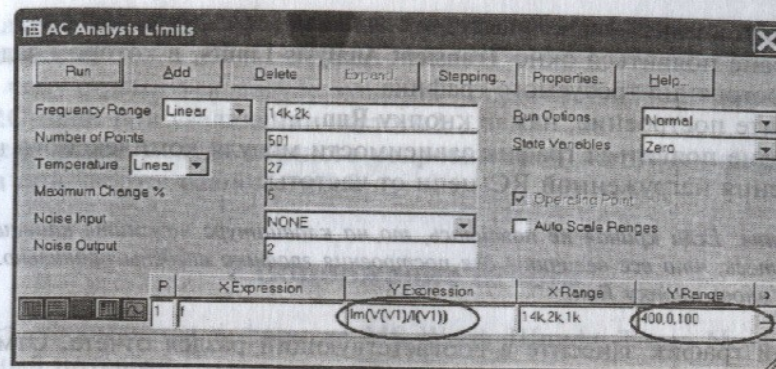


Рис. 25

На экране появится график зависимости реактивного сопротивления конденсатора от частоты.

**Замечание.** Если кривая не появилась, то на клавиатуре нажмите клавишу F9 и убедитесь, что все величины для построения графика введены правильно. Нажмите вновь кнопку **Run**.

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на графике величину тока при  $f = f_{гр}$ .

Для точного определения величины реактивного сопротивления от частоты на клавиатуре нажмите одновременно клавиши <Shift+Ctrl+X>. В появившейся форме **Go To X** введите величину частоты (рис. 19). Полученные данные величин реактивного сопротивления конденсатора занесите в таблицу 1.

#### 4.5 Исследование частотных характеристик нагруженной RC-цепи

##### 4.5.1 Построение зависимости модуля входного сопротивления от частоты

Вернитесь к исходной схеме, нажав на клавиатуре клавишу F3. Параллельно конденсатору включите сопротивление нагрузке  $R_2 = 320 \text{ Ом}$  (рис. 26).

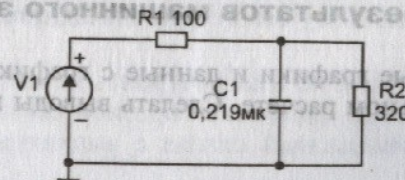


Рис. 26

Убедитесь, что введены все элементы правильно.

Получите зависимость модуля входного сопротивления нагруженной RC-цепи от частоты

$$|Z_{BX}| = |U_{BX}/I| \text{ (MAG(-1*V(V1))/I(V1))}$$



Для этого в меню Analysis выберите команду AC... (рис. 16).

На экране появиться окно **Transient Analysis Limits**, в котором задайте параметры построения требуемого графика.

Запустите построение, нажав кнопку **Run**.

На экране появиться график зависимости модуля комплексного входного сопротивления нагруженной RC-цепи от частоты.

**Замечание.** Если кривая не появилась, то на клавиатуре нажмите клавишу **F9** и убедитесь, что все величины для построения графика введены правильно. Нажмите вновь кнопку **Run**.

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на данном графике асимптоту при увеличении частоты.

#### 4.5.2 Построение зависимости фазы входного сопротивления от частоты

Получите зависимость фазы входного сопротивления нагруженной RC-цепи от частоты

$$\arg(Z_{BX}) = \arg(U_{BX}/I) (\text{ph}(-1 \cdot V(V1)/I(V1))).$$

На клавиатуре нажмите клавишу **F9**. На экране появиться окно **Transient Analysis Limits**, в котором задайте параметры построения требуемого графика. Запустите построение, нажав кнопку **Run**.

На экране появиться график зависимости фазы входного сопротивления нагруженной RC-цепи от частоты.

**Замечание.** Если кривая не появилась, то на клавиатуре нажмите клавишу **F9** и убедитесь, что все величины для построения графика введены правильно. Нажмите вновь кнопку **Run**.

Данный график занесите в соответствующий раздел отчета. Отметьте на графике величину минимального значения фазы входного сопротивления.

Полученные данные величин  $\phi_m$  и  $f_m$  занесите в таблицу 2.

### 5 Обработка результатов машинного эксперимента

Сравнить полученные графики и данные с графиками и данными, полученными в предварительном расчете. Сделать выводы по каждому пункту исследования.

### 6 Вопросы для самопроверки

1. Какая частота называется граничной для RC-цепи?
2. Какая частота называется граничной для RL-цепи?
3. Каково значение модуля входного сопротивления RC-цепи на граничной частоте?

4. Каково значение аргумента входного сопротивления RC-цепи на граничной частоте?

5. К чему стремиться модуль входного сопротивления нагруженной на резистор RC-цепи при увеличении частоты?

6. Чему равен модуль входного сопротивления нагруженной на резистор RC-цепи при частоте равной нулю?

### 7 Содержание отчета

Отчет оформляется в формате MS Word. Шрифт Times New Roman 14, полуторный интервал.

Для защиты лабораторной работы отчет должен содержать следующий материал: титульный лист; цель работы; результаты машинного эксперимента; графики исследуемых зависимостей; выводы. К отчету должны быть приложения в напечатанном виде вопросы для самопроверки и ответы на них.

### 8 Литература

1. Фриск В. В. Основы теории цепей. М.: РадиоСофт, 2002. 288 с.
2. Бакалов В. П., Дмитриков В. Ф., Крук Б. И. Основы теории цепей. М.: Радио и связь, 2003. 592 с.

В появившемся окне Micro-Cap 8.1.0.0 Evaluation Version (рис. 3) выбрать исследуемую систему без обратной связи (рис. 1).

