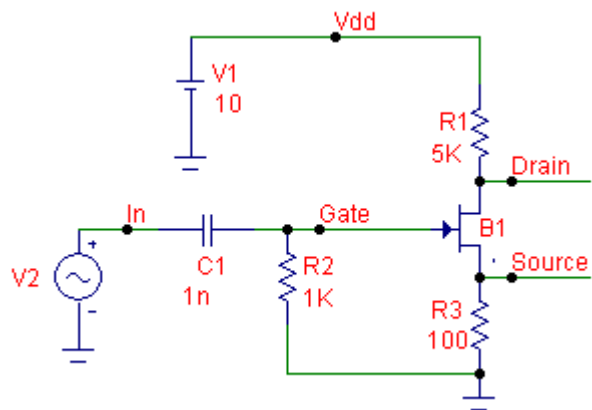


**В.П. Литвиненко**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫЧИСЛЕНИЯ:  
ПРАКТИКУМ**

**Учебное пособие**



**Воронеж 2013**

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет»

В.П. Литвиненко

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫЧИСЛЕНИЯ: ПРАКТИКУМ**

Утверждено Редакционно-издательским советом  
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2013

УДК 621.372

Литвиненко В.П. Моделирование и вычисления: практикум: учеб. пособие / В.П. Литвиненко. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 104 с.

Учебное пособие содержит необходимый материал для проведения лабораторных и практических занятий. Приведены индивидуальные задания, выполнение которых проверяется с помощью автоматизированной контролирующей системы АКЭС-МВ.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки бакалавров 210400 «Радиотехника», профилю «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов», дисциплине «Моделирование и вычисления на ЭВМ»

Табл. 15. Ил. 67. Библиогр.: 5 назв.

Научный редактор канд. техн. наук, доц. Б.В. Матвеев

Рецензенты: кафедра инфокоммуникационных систем и технологий Воронежского института МВД России (начальник кафедры д-р техн. наук, проф. О.И. Бокова);  
канд. техн. наук, доц. М.И. Бочаров.

© Литвиненко В.П., 2013

© Оформление. ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Подготовка современного бакалавра в области радиотехники и электроники немыслима без достаточно глубокого освоения современной вычислительной техники и программного обеспечения. Дисциплина «Моделирование и вычисления на ЭВМ» является базовой при освоении универсальных вычислительных и моделирующих программ.

Для проведения разнообразных вычислений широко используется программа MathCAD. В ней заложены возможности вычисления различных функций и операторов, создания мощных вычислительных программ с развитой логикой преобразования данных, математического и статистического моделирования. Особенностью системы MathCAD является запись рабочей программы так, как это принято человеком при записи последовательности вычислений на бумаге.

При проектировании современных электронных устройств и систем необходимо использовать простые и профессиональные программы схемотехнического моделирования, например, MicroCAP, WorkBench и другие.

## 1. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

### 1.1. Лабораторная работа №1 «Ознакомительная»

В ходе ознакомительной лабораторной работы студент должен усвоить требования по выполнению и оформлению отчетов по последующим лабораторным работам. Отчет по ознакомительной лабораторной работе не оформляется. Ниже в табл. 1.1 приведен весь перечень лабораторных работ.

Таблица 1.1.

№	Наименование лабораторной работы
1	Ознакомительная
2	Вычисление выражений и массивов
3	Функции и графики
4	Уравнения и системы
5	Расчет цепей постоянного тока
6	Модели источников сигнала
7	Моделирование цепи постоянного тока
8	Моделирование цепей с переменными сигналами
9	Моделирование простых электронных устройств

**Отчеты** по лабораторным работам **2-9** оформляются на отдельных **скрепленных** между собой листах формата А4 с указанием Ф.И.О. и группы студента, названия лабораторной работы. Затем следуют разделы, в которых описываются результаты проведенных расчетов, приводятся формулы, таблицы, графики, схемы электрических цепей. После **каждого пункта** лабораторного задания делаются **выводы**. Отчет оформляется в соответствии с **требованиями стандарта ВГТУ**.

Ниже показан пример оформления отчета.

Группа РТ \_\_\_\_\_  
ИВАНОВ И.И.  
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2  
«ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЫРАЖЕНИЙ И МАССИВОВ»

ВВЕДЕНИЕ (цель работы, постановка задачи, методика выполнения)

1. РАСЧЕТ ВЫРАЖЕНИЙ (название раздела)

Вычислим величину

$$a := 20 \cdot (2 + \sqrt{\sqrt{2} \cdot 7}) = 102.927,$$

результат запишем в табл. 1. Найдем .... Определим ...

Таблица 1. Результаты вычислений (название)

a			
102,927			

График функции ..... показан на рис. 1.

Рисунок

Рисунок 1.- График функции .... (название)

Разбиение материала на разделы производится студентом самостоятельно. Один раздел может охватывать один или несколько близких по смыслу пунктов задания. Раздел может разбиваться на подразделы, каждый из которых соответствует пункту лабораторного задания или его части. В конце отчета

оставляется место для заключения (общих выводов) по работе. Результаты всех расчетов необходимо проанализировать и сделать соответствующие выводы, начиная с наиболее значимых.

Заключение содержит краткие общие выводы по лабораторной работе, объединяющие выводы, сделанные ранее по каждому пункту лабораторного задания.

Приведенные рисунки и таблицы сопровождаются названиями. В тексте ссылки на рисунки и таблицы записываются сокращенно (рис.1, табл.2). Другие сокращения слов стандарт **запрещает**.

По окончании работы студент оформляет отчет, делает выводы, пишет заключение и предъявляет отчет преподавателю для проверки и сдачи зачета. Зачет предполагает объяснение полученных результатов, ответы на теоретические вопросы и выполнение заданий, связанных с тематикой проведенных исследований.

При выполнении лабораторных работ 2-9 указанные результаты вычислений проверяются студентами самостоятельно и индивидуально с помощью автоматизированной контролирующей системы **АКОС-МВ**.

Для проведения зачетов по темам и проверки качества обучения используется автоматизированная тестирующая система **ТЕСТ-МВ**.

В ходе ознакомительной лабораторной работы необходимо провести общее (первоначальное) ознакомление с программой MathCAD, ее простейшими возможностями и основными элементами меню.

1.2. Лабораторная работа №2 «Вычисление выражений и массивов»

1.2.1. Вычисление выражений

Полученные результаты проверяются автоматизированной контролирующей системой **АКОС-МВ** как «Тема 1».

Для заданных значений номера группы **G** и номера студента в списке группы **N** вычислите в программе **MathCAD** величину

$$a_1 = 20 \left( G + \sqrt{\sqrt{2} \cdot N} \right)$$

и введите ее для проверки в АКОС-МВ: **тема 1, ответ 1.**

Проведите суммирование в выражении

$$a_2 = \sum_{k=0}^3 \left( G + \sqrt{\sqrt{2} \cdot N} \right)^k,$$

результат внесите в АКОС-МВ: **тема 1, ответ 2.**

Определите произведение

$$a_3 = 50 \cdot \prod_{k=1}^2 \left[ \frac{(\sqrt{N} + 1)^2}{G + 10} \right]^k$$

результат введите в АКОС-МВ: **тема 1, ответ 3.**

Вычислите величину

$$a_4 = 1000 \cdot \sin(\varphi),$$

где  $\varphi = 3G^2 + N$  **градусов**, результат занесите для проверки

в АКОС-МВ: **тема 1, ответ 4.**

Определите экспоненту

$$a_5 = 10 \cdot \exp \left[ \frac{3 \cdot G^2 + N}{100} \right]$$

и введите ее для проверки в АКОС-МВ: **тема 1, ответ 6.**

Вычислите логарифм

$$a_6 = 500 \cdot \log_{G+1} (3 \cdot G^2 + N),$$

результат внесите в АКОС-МВ: **тема 1, ответ 6.**

Проведите вычисление любой из заданных величин с помощью калькулятора, запишите результаты расчета, сравните трудоемкость вычислений, сделайте выводы.

1.2.2. Комплексные числа

Результаты проверяются автоматизированной контролирующей системой **АКОС-МВ** как «Тема 2».

Для заданных значений номера группы **G** и номера студента в списке группы **N** вычислите в программе **MathCAD** величины

$$x1 = 2 \cdot G + (-1)^{G+N} \frac{N}{2}, \quad y1 = \frac{N}{2 \cdot G + \sqrt{N}},$$

$$x2 = \frac{N}{(-1)^{G+N} G}, \quad y2 = 4 \cdot G + \sqrt{N}.$$

Определите комплексные числа

$$z1 = x1 + j \cdot y1 \quad \text{и} \quad z2 = x2 + j \cdot y2,$$

где  $j = \sqrt{-1}$  - мнимая единица.

Рассчитайте произведение комплексных чисел  $z_1$  и  $z_2$ ,  $A_1 = 5 \cdot z_1 \cdot z_2$  и представьте его в виде  $A_1 = a_1 + j \cdot b_1$  ( $a_1$  - действительная, а  $b_1$  - мнимая части произведения). Результаты введите в АККОС-МВ:  $a_1$  - **тема 2, ответ 1**,  $b_1$  - **тема 2, ответ 2**.

Вычислите частное

$$A_2 = 1000 \frac{z_1}{z_2},$$

запишите его в виде  $A_2 = a_2 + j \cdot b_2$  ( $a_2$  - действительная, а  $b_2$  - мнимая части) и введите результаты в АККОС-МВ:  $a_2$  - **тема 2, ответ 3**,  $b_2$  - **тема 2, ответ 4**.

Определите **модуль** величины  $A_2$ ,

$$B = |A_2|,$$

полученную величину внесите в АККОС-МВ: **тема 2, ответ 6**.

Найдите аргумент величины  $A_2$ ,

$$\varphi = \arg(A_2),$$

и результат расчета **в градусах** внесите в АККОС-МВ: **тема 2, ответ 6**.

Вычислите частное  $A_2$  с помощью калькулятора, **опишите промежуточные вычисления**, сделайте выводы.

### 1.2.3 Массивы

Вычислите элементы одномерного массива (вектора, матрицы) из четырех элементов

9

$$a_k = a_0 + k \cdot d, \quad k = 0, 1, 2, 3,$$

где

$$a_0 = G^2 + N,$$

$$d = (-1)^{N+G} \sqrt{N+G}.$$

Запишите полученный массив в виде матрицы – **столбца**

$$a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}.$$

Аналогично сформируйте массив

$$b_k = a_0 - k \cdot d, \quad k = 0, 1, 2, 3,$$

и запишите его в виде матрицы – **столбца**

$$b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

Средствами программы MathCAD получите суммарную матрицу

$$u = a + b$$

и введите в АККОС-МВ (**Тема 3**) ее последний элемент:  $u_3$  - **тема 3, ответ 1**.

10

Аналогично сформируйте разностную матрицу

$$w = a - b$$

и внесите в АКООС-МВ (Тема 3) ее элемент:  $w_2$  - тема 3, ответ 2.

Определите модуль вектора (массива)  $a$ , по определению равный квадратному корню из суммы квадратов элементов,

$$z = |a|,$$

величину  $z$  проверьте в АКООС-МВ (Тема 3):  $z$  - тема 3, ответ 3. Вычислите эту величину в соответствии с определением, сравните результаты, сделайте выводы.

В MathCAD функция  $f(a)$  от массива  $a$  равна массиву функций от элементов исходного массива. Вычислите массив (вектор – столбец)

$$f(a) = \exp(a/30) = \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}$$

и введите значение  $f_1$  в АКООС-МВ (Тема 3):  $f_1$  - тема 3, ответ 4.

Вычислите массив (вектор – столбец)

$$g(a) = \sqrt{b} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix}$$

Элемент массива  $g_0$  внесите в АКООС-МВ (Тема 3):  $g_0$  - тема 3, ответ 6.

Определите произведение двух матриц (транспонированной матрицы  $a$  и матрицы  $b$ ),

$$c = a^T \times b,$$

величину  $c$  введите в АКООС-МВ (Тема 3):  $c$  - тема 3, ответ 6. Проведите перемножение матриц с помощью калькулятора, приведите в отчете промежуточные вычисления, сравните результаты, сделайте выводы.

### 1.3. Лабораторная работа №3 «Функции и графики»

#### 1.3.1. Функции одной переменной

Постройте график функции

$$y1(x) = \sin(a \cdot x)$$

при  $a = \frac{G^2 + N}{100}$  на интервале двух - четырех периодов. Значение  $100 \cdot y1(1)$  введите в АКООС-МВ (Тема 4):  $100 \cdot y1(1)$  - тема 4, ответ 1.

Получите график экспоненциальной функции

$$y2(x) = \exp(b \cdot x)$$

при  $b = \sin(N + G)$  (аргумент в радианах), подберите целесообразный интервал изменения аргумента  $x$ , проанализируйте и объясните полученные результаты (можно привести несколько графиков). Величину  $10 \cdot y2(1)$  введите в АКООС-МВ (Тема 4):  $10 \cdot y2(1)$  - тема 4, ответ 2.

### 1.3.2. Функции, заданные параметрически

При параметрическом определении функция  $y(x)$  задается двумя выражениями

$$\begin{cases} x = f_1(t), \\ y = f_2(t), \end{cases}$$

то есть обе координаты зависят от общей переменной  $t$ .

Постройте график функции

$$\begin{cases} x = a \cdot \sin(t), \\ y = b \cdot \cos(t) \end{cases}$$

при значениях  $a$  и  $b$ , заданных в пункте 1.3.1. Как называется такая кривая, на что влияют величины  $a$  и  $b$ ? Приведите несколько вариантов графиков.

Величину  $100 \cdot y(0,5)$  введите в АКОС-МВ (Тема 4):  $100 \cdot y(0,5)$  - тема 4, ответ 3.

### 1.3.3. Годограф

Годографом называют отображение на комплексной декартовой плоскости комплексной функции  $z(\omega)$  действительной переменной  $\omega$ . Для его построения задается интервал и шаг  $\Delta\omega$  изменения  $\omega$ , для каждой точки вычисляются комплексные значения  $z(\omega)$  и на комплексной плоскости на оси абсцисс отмечаются значения действительной части  $\text{Re}(z(\omega))$ , а на оси ординат – мнимой части  $\text{Im}(z(\omega))$  функции  $z(\omega)$ .

Постройте годограф комплексной функции действительной переменной

$$z(\omega) = \frac{1}{1 + j \cdot a \cdot \omega}$$

при

$$a = \frac{G^2 + N}{100}.$$

Значение  $1000 \cdot \text{Re}(z(3))$  введите в АКОС-МВ (Тема 4):  $1000 \cdot \text{Re}(z(3))$  - тема 4, ответ 4.

### 1.3.4. Функции двух переменных

Рассмотрите функцию двух переменных

$$F(x, y) = a \cdot x + b \cdot y.$$

при значениях  $a$  и  $b$ , заданных в пункте 1.3.1. Постройте график этой функции в трехмерной декартовой системе координат. Как на него влияют параметры  $a$  и  $b$ ? Приведите несколько таких графиков, объясните причины наблюдаемых изменений.

Величину  $100 \cdot F(2,2)$  введите в АКОС-МВ (Тема 4):  $100 \cdot F(2,2)$  - тема 4, ответ 5.

Постройте график функции

$$G(x, y) = a \cdot x^2 + b \cdot y^2,$$

проанализируйте влияние параметров.

Значение  $100 \cdot G(2,2)$  введите в АКОС-МВ (Тема 4):  $100 \cdot G(2,2)$  - тема 4, ответ 6.



#### 1.4. Лабораторная работа №4 «Уравнения и системы»

1.4.1. Решите квадратное уравнение

$$x^2 - a \cdot x + b = 0$$

при

$$a = \frac{G^2 + N}{100} \quad \text{и} \quad b = \sin(N + G) - 2,$$

запишите формулы для двух корней  $x_1$  и  $x_2$ , вычислите их значения. Решите это же уравнение, используя функцию `Root[f(x),x]` в программе MathCAD, подберите начальные значения переменной  $x$ , при которых поочередно определяются оба корня уравнения.

Меньшее и большее значения корней, умножив их на 1000, введите в АККОС-МВ (Тема 5): **тема 5, ответы 1 и 2 соответственно.**

1.4.2. Определите корни системы двух уравнений

$$\begin{cases} a \cdot x^2 + b \cdot y^2 = 10, \\ x + y = 2, \end{cases}$$

при

$$a = \frac{G^2 + N}{100} \quad \text{и} \quad b = \sin(N + G) + 2,$$

получите для них аналитические выражения и численные значения. Решите эту задачу с помощью программы MathCAD, используя процедуру `Given ... Find(x,y)`, сравните полученные результаты.

**Меньшие** (из двух возможных) значения корней  $x$  и  $y$ , умножив их на 1000, введите в АККОС-МВ (Тема 5): **тема 5, ответы 3 и 4 соответственно.**

Повторите расчет в программе MathCAD, используя функцию `Minerr(x,y)`, сравните результаты.

1.4.3. Определите максимум функции

$$f(x, y) = 2 + x + y - 0,1 \cdot a \cdot x^2 - 0,1 \cdot b \cdot y^2$$

двух переменных при

$$a = \frac{G^2 + N}{100} \quad \text{и} \quad b = \sin(N + G) + 2,$$

найдите формулы для его координат  $x_{\max}$  и  $y_{\max}$ , вычислите их значения. Получите эти результаты с помощью функции `Maximize(f,x,y)` программы MathCAD и сравните их с аналитическими расчетами, сделайте выводы.

Значения корней  $100 \cdot x_{\max}$  и  $100 \cdot y_{\max}$  введите в АККОС-МВ (Тема 5): **тема 5, ответы 5 и 6 соответственно.**

1.5. Лабораторная работа №5 «Расчет цепи постоянного тока»

1.5.1. В схеме цепи, показанной на рис. 1.1 установите ключи  $K_5 \div K_1$  в положение, соответствующее **двоичному коду** Вашего номера  $N$  по модулю 32 в списке группы (таблица кодов в приложении 1), кодовая запись имеет вид  $K_5 K_4 K_3 K_2 K_1$ , значения  $K_i = 0$  или 1,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ . Зарисуйте полученный вариант электрической цепи. Значения сопротивлений элементов цепи в **Омах** определяются выражением

$$R_k = 1000 \cdot [1,2 + \sin(k \cdot G + N)],$$

где  $G$  - номер группы,  $N$  - номер студента в списке группы,  $k$  - номер сопротивления в схеме на рис. 1.1. Значение тока  $I$  источника примите равным 1 А.

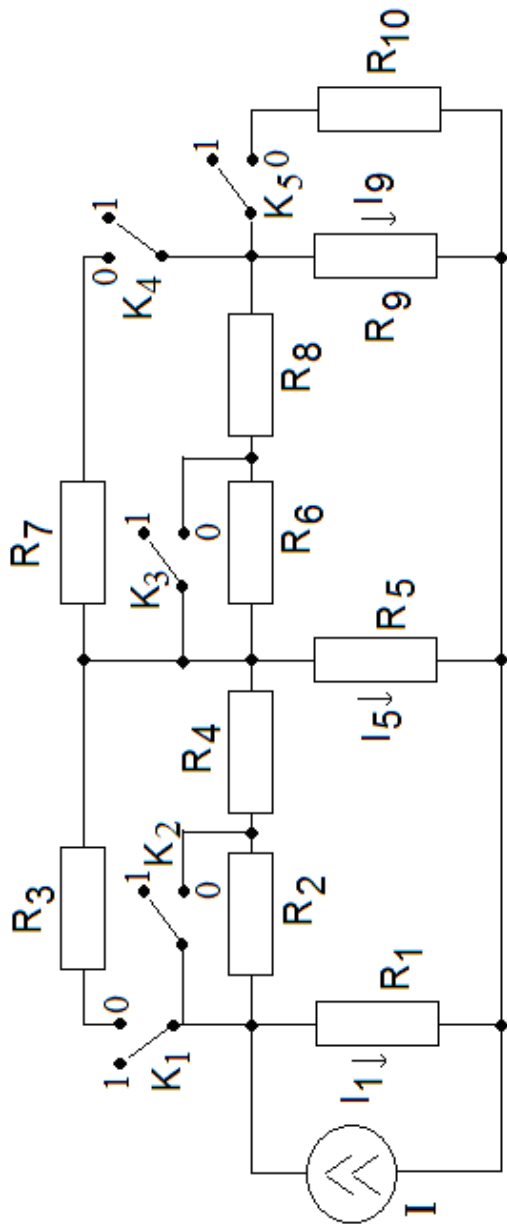


Рис. 1.1

Запишите полную систему уравнений для токов и напряжений в полученной цепи в соответствии с общим методом расчета на основе законов Ома и Кирхгофа. Преобразуйте ее в систему уравнений для токов ветвей.

Решите систему уравнений токов ветвей аналитически, получите выражения для токов  $I_1$ ,  $I_5$  и  $I_9$ . Вычислите значения этих токов, проведите проверку правильности полученных решений.

Получите численное решение **полной** системы уравнений для токов и напряжений в программе MathCAD, Проведите проверку выполнимости всех законов Кирхгофа для Вашего варианта цепи. Вычислите значения токов  $I_1$ ,  $I_5$  и  $I_9$ , сравните с результатами аналитических расчетов.

Значения токов  $I_1$ ,  $I_5$  и  $I_9$  в **миллиамперах** введите в АККОС-МВ (Тема 6): **тема 6, ответы 1, 2 и 3 соответственно.**

1.5.2. В схеме цепи, показанной на рис. 1.2 установите ключи  $K_5 \div K_1$  в положение, соответствующее **двоичному коду** Вашего **номера N по модулю 32** в списке группы  $K_5K_4K_3K_2K_1$ , значения  $K_i = 0$  или  $1$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ . Зарисуйте полученный вариант электрической цепи. Значения сопротивлений элементов цепи в **Омах** определяются выражением

$$R_k = 1000 \cdot [1,5 + \sin(k \cdot G + N)],$$

где  $G$  - номер группы,  $N$  - номер студента в списке группы,  $k$  - номер сопротивления в схеме на рис. 1.2 (обратите внимание на изменение номеров сопротивлений). Значение ЭДС источника  $E$  примете равной **10 В**.

Запишите полную систему уравнений для токов и напряжений в полученной цепи в соответствии с общим методом расчета на основе законов Ома и Кирхгофа. Преобразуйте ее в систему уравнений для токов ветвей.

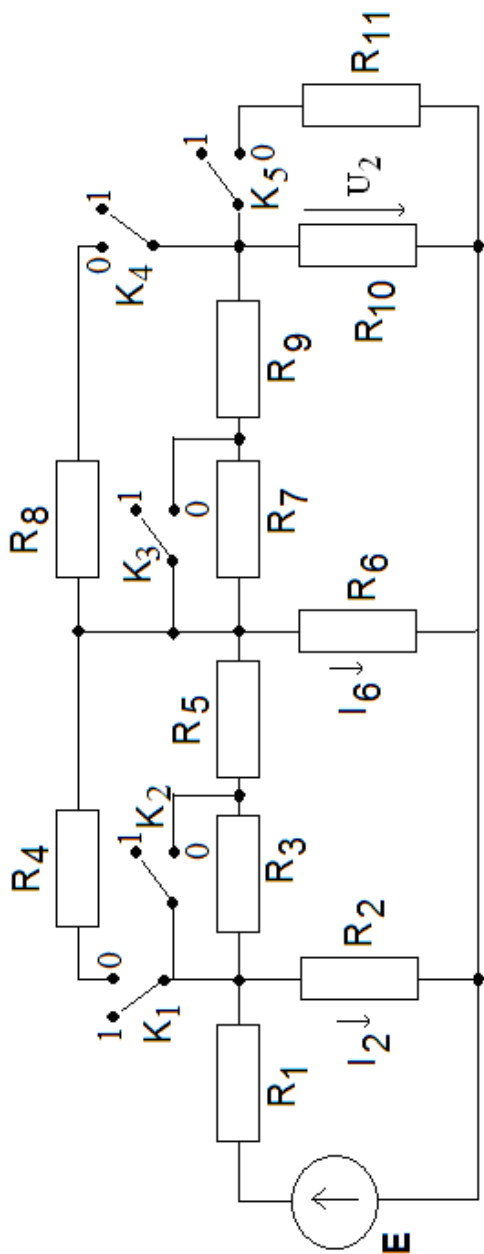


Рис 1.2

Решите систему уравнений токов ветвей аналитически, получите выражения для токов  $I_2$  и  $I_6$ . Вычислите значения этих токов, проведите проверку правильности полученных решений.

Получите численное решение **полной** системы уравнений для токов и напряжений в программе MathCAD, Проведите проверку выполнимости всех законов Кирхгофа для Вашего варианта цепи. Вычислите значения токов  $I_2$  и  $I_6$ , сравните с результатами аналитических расчетов.

Значения токов  $I_2$  и  $I_6$  в миллиамперах введите в АККОС-МВ (Тема 6): **тема 6, ответы 4 и 5 соответственно.**

1.5.3. Из полученной в пункте 1.5.2 системы уравнений получите выражение для выходного напряжения  $U_2$  (рис. 1.2), приведите его к виду

$$U_2 = H \cdot E,$$

где величину  $H$  называют коэффициентом передачи цепи по постоянному току. Вычислите  $H$  и значение  $1000 \cdot H$  введите для проверки в АККОС-МВ (Тема 6): **тема 6, ответ 6.**

### 1.6. Лабораторная работа №6 «Модели источников сигнала»

1.6.1. Запустите программу MicroCAP и «соберите» на экране монитора модель цепи постоянного тока, показанную на рис 1.3, с источником постоянного напряжения (Battery) V1 и двумя сопротивлениями R1 и R2,

$$V1 = 4 + G/2 \text{ В}, R1 = (20 + N) \text{ Ом} \text{ и } R2 = (2 + G) \text{ Ом}$$

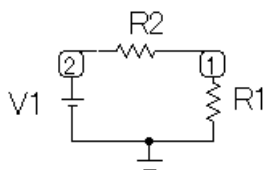


Рис. 1.3

В меню «Анализ» выберите режим «Расчет по постоянному току», нажмите «ОК» и определите напряжения в узлах 1 и 2 (на выходе и входе цепи соответственно), запишите их в табл. 1.1. Проведите расчет этих напряжений, используя закон Ома, запишите их в табл. 1.1, сравните результаты.

Соберите схему рис. 1.3 в программе WorkBench (рис. 1.4), проведите моделирование, результаты внесите в табл. 1.2.

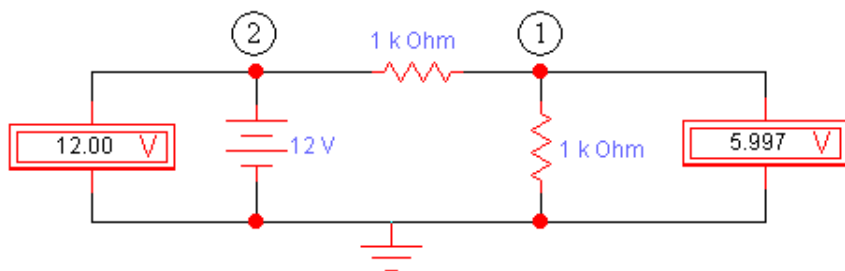


Рис. 1.4

Таблица 1.2

Напряжения в узлах:	1	2
моделирование в MicroCAP		
моделирование в WorkBench		
расчет		

Значение напряжения  $V1$  в узле 1 в милливольтках введите в АККОС-МВ (Тема 7): **тема 7, ответ 1.**

В программе MicroCAP для цепи на рис. 1.3 в меню «Анализ» в режиме «Расчет по постоянному току» нажмите кнопку вывода значений мощности «Powers» в элементах цепи, внесите полученные результаты в табл. 1.2.

В программе WorkBench «соберите» цепь, показанную на рис. 1.5, и по результатам моделирования тока и напряжений определите мощности, потребляемые от источника в сопротивлениях, результаты внесите в табл. 1.2..

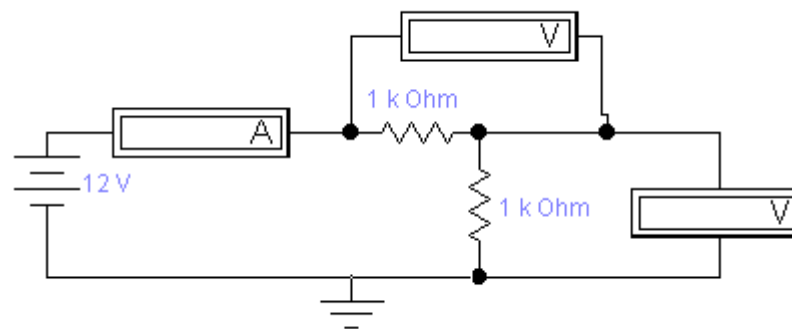


Рис. 1.5

Рассчитайте эти мощности, используя закон Ома, занесите результаты в табл. 1.3, сделайте выводы.

Таблица 1.3

Мощность в	V1	R1	R2
моделирование в MicroCAP			
моделирование в WorkBench			
расчет			

Величину мощности в сопротивлении R1 в милливаттах внесите в АККОС-МВ (Тема 7): **тема 7, ответ 2.**

В программе MicroCAP для цепи на рис. 1.3 в меню «Анализ» выберите режим «Передаточные характеристики по постоянному току», задайте имя изменяемой переменной V1 и получите на одном графике зависимости входного V(2) и выходного V(1) напряжения от напряжения источника V1, приведите в отчете соответствующий график. Проанализируйте результаты, сделайте выводы.

1.6.2. В программе MicroCAP «соберите» на экране монитора модель цепи с источником гармонического напряжения (Sine Source, модель 1 MHz), показанную на рис 1.6. Задайте  $R1 = (5 + G)$  кОм и  $R2 = (5 + N)$  кОм.

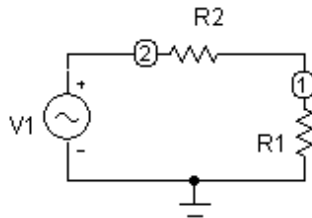


Рис. 1.6

Установите частоту  $F$  источника V1, равную

$$F = \frac{N + G}{20} \text{ МГц}$$

и амплитуду  $A$  колебаний

$$A = \sqrt{N \cdot G} \text{ В.}$$

В меню «Анализ» выберите режим «Переходные процессы» и получите временные диаграммы напряжений в узлах 1 и 2 и тока между узлами 1 и 2 (в сопротивлении R2), их амплитуды запишите в табл. 1.4. Приведите в отчете полученные временные диаграммы.

Таблица 1.4.

Величина	V(1) В	V(2) В	I(2,1) мкА
моделирование в MicroCAP			
моделирование в WorkBench			
расчет			

В программе WorkBench постройте цепь, показанную на рис. 1.7, задайте те же параметры, что и для модели в MicroCAP. В измерительных приборах установите режим измерения переменного сигнала (AC). Определите действующие значения напряжений в узлах и тока цепи, запишите результаты в табл. 1.4, проанализируйте, чем они отличаются от предыдущих, сделайте выводы.

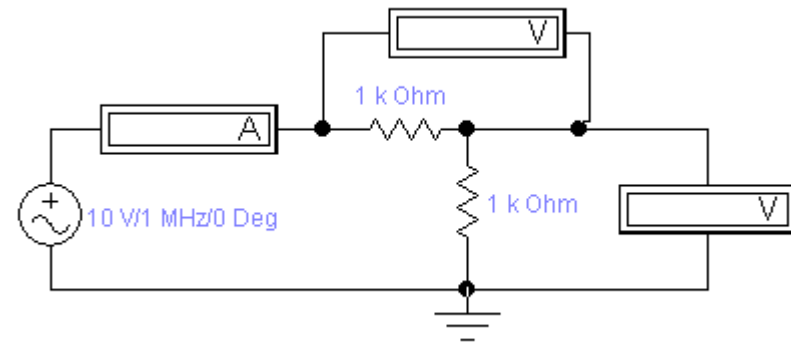


Рис. 1.7

Рассчитайте амплитуды напряжения в узлах и тока в сопротивлении R2, результаты занесите в таблицу 1.3.

Значение амплитуды напряжения V(1) на сопротивлении R1 в милливольты внесите в АККОС-МВ (Тема 7): **тема 7, ответ 3.**

Величину амплитуды тока  $I(2,1)$  в микроамперах введите в АККОС-МВ (Тема 7): **тема 7, ответ 4.**

В программе MicroCAP в режиме «Переходные процессы» сформируйте временные диаграммы гармонических напряжений в узлах цепи рис. 1.6 и тока цепи на интервале нескольких периодов. По временным диаграммам напряжений и тока определите **период  $T$**  гармонического сигнала, вычислите ту же величину, используя частоту  $F$ , сравните результаты, сделайте выводы.

Постройте цепь рис. 1.6 в программе WorkBench (рис. 1.8) с подключенным осциллографом.

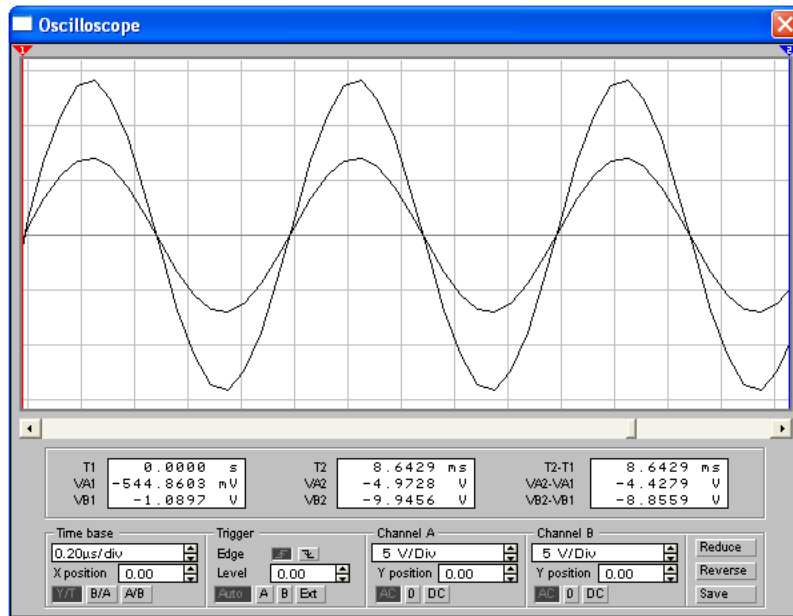
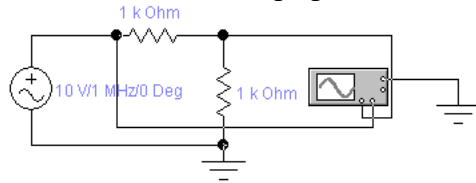


Рис. 1.8  
25

По временным диаграммам напряжений и тока определите амплитуды напряжений и **период  $T$**  гармонического сигнала, сравните с результатами предыдущих измерений.

Величину периода  $T$  в наносекундах внесите в АККОС-МВ (Тема 7): **тема 7, ответ 6.**

1.6.3. В программе MicroCAP постройте модель цепи с источником импульсного напряжения (Pulse Source, модель Pulse), показанную на рис 1.9. Задайте  $R1 = (5 + G) \text{ кОм}$  и  $R2 = (5 + N) \text{ кОм}$ .

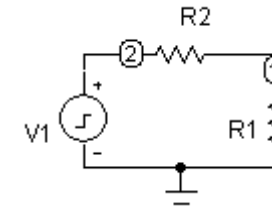


Рис. 1.9

Для источника установите низкий уровень напряжения (VZERO) равным 0 и высокий уровень импульса (VONE) равным  $A = \sqrt{N \cdot G} \text{ В}$ . Параметры импульсного сигнала показаны на рис. 1.10.

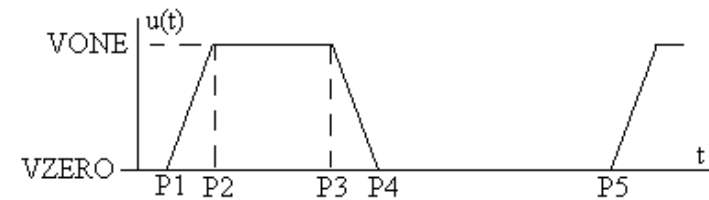


Рис. 1.10

Частоту повторения импульсов примите равной

$$F = \frac{N + G}{20} \text{ МГц}.$$

Определите период повторения импульсов  $T$  (пункт 1.6.2).

Установите параметры последовательности **прямоугольных** импульсов с длительностью, равной половине периода - **меандра** (рис. 1.10) в соответствии с табл. 1.5 (вариант 1). Получите временные диаграммы напряжений в узлах 1 и 2, приведите в отчете соответствующий графики.

Таблица 1.5

Вариант	Параметр				
	P1	P2	P3	P4	P5
1	0	0	$T/2$	$T/2$	$T$
2	0	0	$T/10$	$T/10$	$T$
3	0	$T/20$	$T/2 - T/20$	$T/2$	$T/2$

Сформируйте сигнал в виде последовательности коротких импульсов (вариант 2 в табл. 1.5), опишите полученные временные диаграммы. Создайте сигнал в виде последовательности трапецевидных импульсов (вариант 3 в табл. 1.5), приведите в отчете соответствующие временные диаграммы.

По временной диаграмме определите **амплитуду напряжения  $V(1)$  на сопротивлении  $R_1$** , вычислите ту же величину на основе закона Ома, сравните результаты, сделайте выводы.

Величину напряжения  $V(1)$  в милливольтгах внесите в АККОС-МВ (Тема 7): **тема 7, ответ 6.**

Проведите моделирование цепи вида рис. 1.7 в программе WorkBench, как показано на рис. 1.11. Для функционального генератора установите импульсный сигнал – меандр с той же частотой, что и в программе MicroCAP. Проведите моделирование, сравните результаты.

Установите пилообразный сигнал генератора, получите временные диаграммы наблюдаемых на рис 1.11 напряжений.

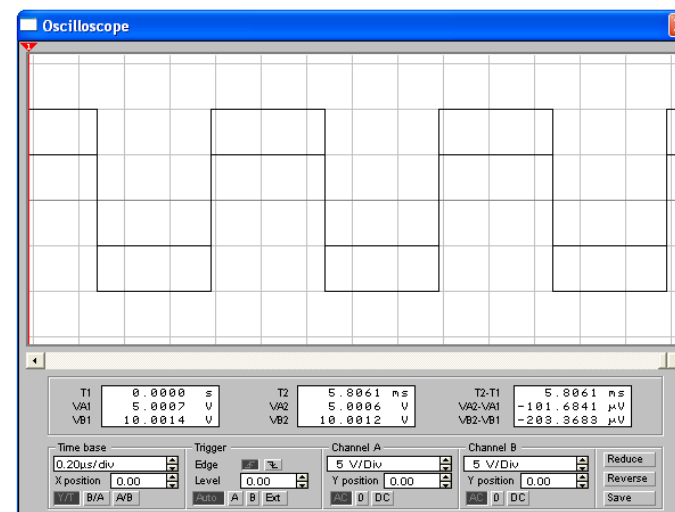
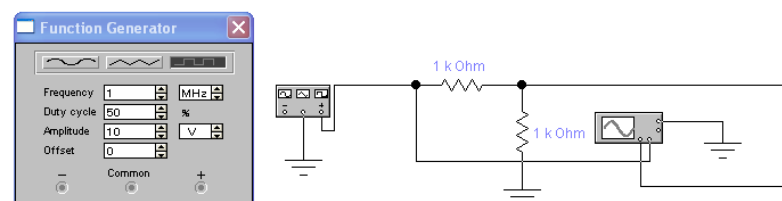


Рис. 1.11

## 1.7. Лабораторная работа №7 «Моделирование цепи постоянного тока»

1.7.1. В схеме цепи, показанной на рис. 1.12 установите ключи  $K_5 \div K_1$  в положение, соответствующее **двоичному коду** Вашего **номера  $N$  по модулю 32** в списке группы  $K_5 K_4 K_3 K_2 K_1$ , значения  $K_i = 0$  или  $1$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ . Зарисуйте полученный вариант электрической цепи. Значения сопротивлений элементов цепи в **Омах** определяются выражением

$$R_k = 1000 \cdot [1,5 + \sin(k \cdot G + N)],$$

где  $G$  - номер группы,  $N$  - номер студента в списке группы,  $k$  - номер сопротивления в схеме на рис. 1.12. Значение ЭДС источника  $E$  примете равной **10 В**. Эта же схема рассматривалась в пункте 1.6.2 **лабораторной работы №5** (рис. 1.2).

Рассчитайте значения напряжений  $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$ , показанных на рис. 1.12 для Вашего варианта цепи, проверьте правильность полученных решений с помощью второго закона Кирхгофа, используя для вычислений программу MathCAD. Результаты расчета занесите в табл. 1.6.

Проведите схемотехническое моделирование Вашего варианта цепи в программе MicroCAP, в режиме «Расчет по постоянному току» получите значения напряжений  $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$ , результаты запишите в табл. 1.6, проведите сравнительный анализ.

Таблица 1.6.

Напряжение	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_3, В$	$U_4, В$	$U_5, В$	$U_6, В$
Расчет						
моделирование в MicroCAP						
моделирование в WorkBench						
Номер ответа в АККОС-МВ (Тема 8)	1	2	3	4	5	6

Проведите моделирование цепи в программе WorBench, с помощью вольтметра «измерьте» напряжения на элементах цепи, результаты внесите в табл. 1.6.

Значения напряжений в **милливольтгах** введите в АККОС-МВ (Тема 8): **тема 8, ответы 1-6 в соответствии с табл. 1.6.**

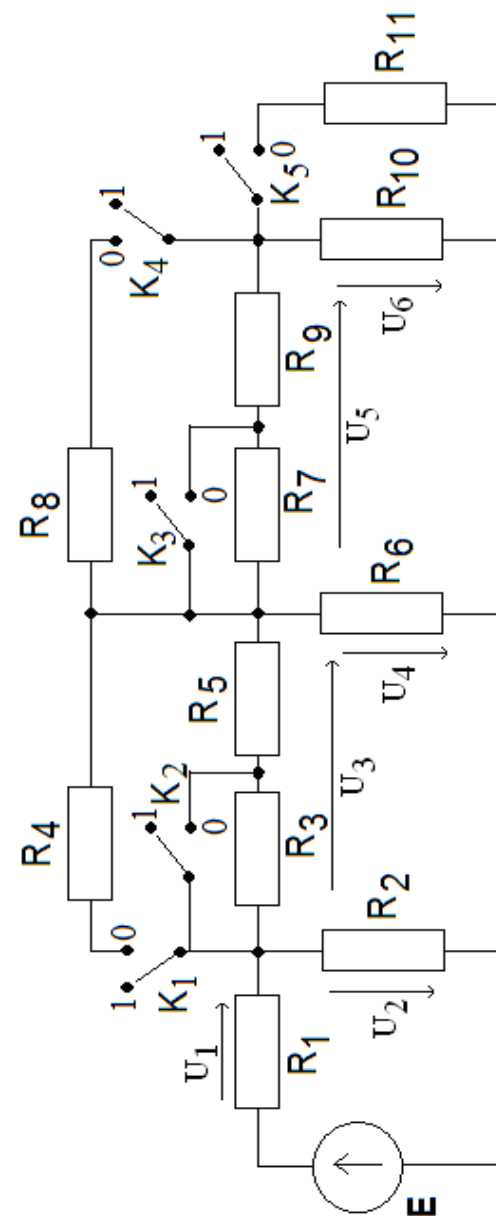


Рис. 1.12



1.7.2. В режиме «Передаточные характеристики по постоянному току» для заданного варианте цепи получите зависимость выходного напряжения  $V_6$  от входной ЭДС  $E$ , приведите в отчете полученный график.

Представив передаточную характеристику в виде

$$U_6 = H \cdot E,$$

определите величину  $H$  (коэффициента передачи цепи по постоянному току), сравните с результатом лабораторной работы №6.

Значение  $1000 \cdot H$  введите для проверки в АККОС-МВ (Тема 9): **тема 9, ответ 1.**

1.7.3. В схеме цепи, показанной на рис. 1.13, установите ключи  $K_5 \div K_1$  в положение, соответствующее **двоичному коду** Вашего **номера  $N$  по модулю 32** в списке группы (таблица кодов в приложении 1), кодовая запись имеет вид  $K_5K_4K_3K_2K_1$ , значения  $K_i = 0$  или  $1$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ . Зарисуйте полученный вариант электрической цепи. Значения сопротивлений элементов цепи в **Омах** определяются выражением

$$R_k = 1000 \cdot [1,2 + \sin(k \cdot G + N)],$$

где  $G$  - номер группы,  $N$  - номер студента в списке группы,  $k$  - номер сопротивления в схеме на рис. 1.8. Значение тока  $I$  источника примите равным 1 А.

Полученная схема рассматривалась в пункте 1.6.1 лабораторной работы №6.

Рассчитайте значения напряжений  $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5$ , показанных на рис. 1.13 для Вашего варианта цепи, проверьте правильность полученных решений с помощью второго закона Кирхгофа, используя для вычислений программу MathCAD. Результаты расчета занесите в табл. 1.7.

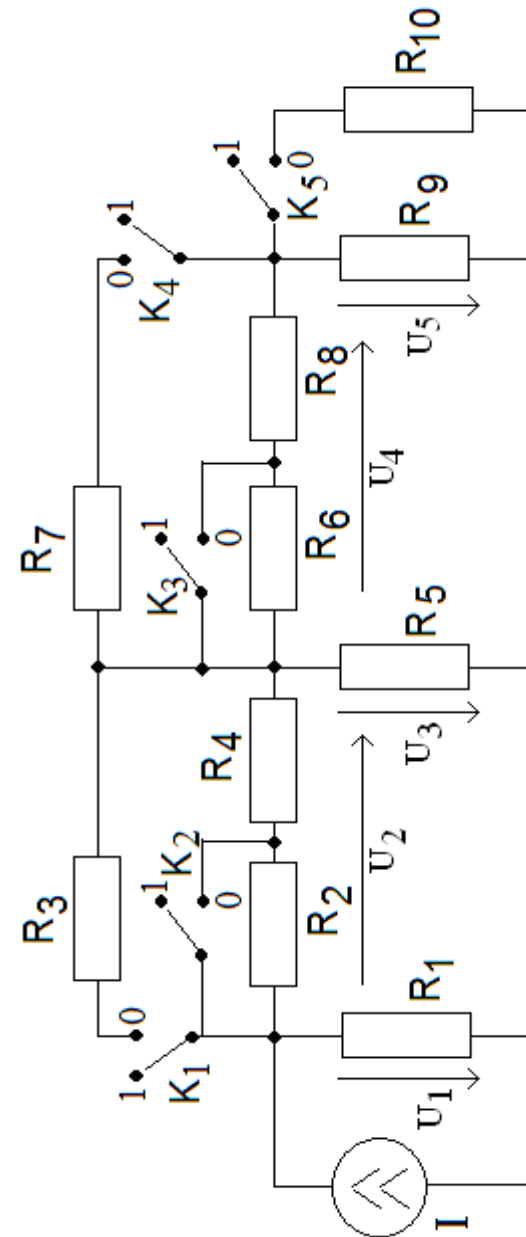


Рис. 1.13

Таблица 1.7.

Напряжение	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_3, В$	$U_4, В$	$U_5, В$
Расчет					
моделирование в WorkBench					
Номер ответа в АККОС-МВ (Тема 9)	2	3	4	5	6

Проведите схемотехническое моделирование Вашего варианта цепи в программе WorkBench (пример упрощенной модели показан на рис. 1.14), получите значения напряжений  $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$ , результаты запишите в табл. 1.7, проведите сравнительный анализ.

Значения напряжений в **вольтгах** введите в АККОС-МВ (Тема 9): **тема 9, ответы 2-6 в соответствии с табл. 1.7.**

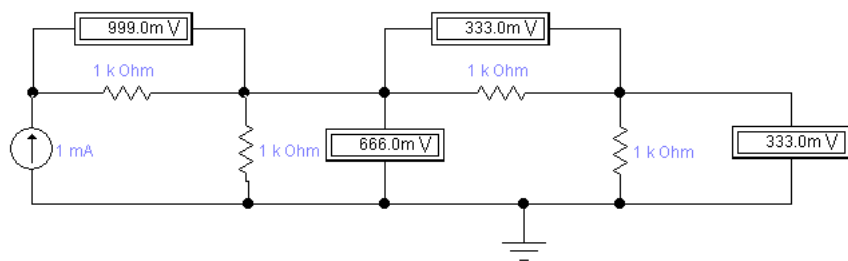


Рис. 1.14

### 1.8. Лабораторная работа №8 «Моделирование цепей с переменными сигналами»

1.8.1. В программе MicroCAP постройте модель цепи с источником гармонического напряжения (Sine Source, модель 1 MHz), показанную на рис 1.15. Задайте  $R1 = (5 + G) кОм$ ,

$R2 = (5 + N) кОм$  и  $C1 = (50 + 2N + 10G) нФ$ .

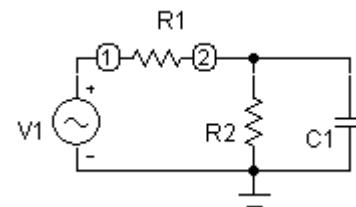


Рис. 1.15

Установите частоту  $F$  источника V1, равную

$$F = \frac{N + G}{20} МГц$$

и амплитуду  $A$  колебаний

$$A = \sqrt{N \cdot G} В.$$

В меню «Анализ» выберите режим «Переходные процессы» и получите временные диаграммы напряжений в узлах 1 и 2 и токов в сопротивлениях R1, R2 и емкости C, их **амплитуды** запишите в табл. 1.8. Приведите в отчете полученные временные диаграммы. Проведите анализ амплитудных и фазовых соотношений между напряжениями и токами.

Таблица 1.8.

Величина	V(1) В	V(2) В	I (R1) мА	I (R2) мА	I (C1) мА
моделирование в MicroCAP					
моделирование в WorkBench					
расчет					

Рассчитайте амплитуды и начальные фазы напряжений в узлах 1 и 2 и токов в сопротивлениях R1, R2 и емкости C, полученные амплитуды запишите в табл. 1.8, сравните результаты

Амплитуды токов I(R1) и I(C1) в микроамперах внесите в АККОС-МВ (Тема 10): **тема 10, ответы 1 и 2 соответственно.**

1.8.2. Вычислите сдвиги фаз  $\varphi$  между напряжением V(2), а также токами в сопротивлениях R1, R2 и емкости C и напряжением источника u(1), выбранным в качестве опорного, соответственно,

$$\varphi = \psi_2 - \psi_1,$$

где  $\psi_2$  - начальная фаза выбранного сигнала, а  $\psi_1$  - начальная фаза опорного напряжения источника V(1), результаты занесите в табл. 1.9.

Таблица 1.9.

Сигнал	u(2)	i (R1)	i (R2)	i (C1)
Сдвиг фаз $\varphi$ , рад				
Сдвиг по времени $\Delta t_p$ (расчет), мкс				
Сдвиг по времени $\Delta t_M$ (моделирование), мкс				

Рассчитайте сдвиги по времени  $\Delta t_p$  между соответствующими сигналами и V(1)

$$\Delta t_p = -\frac{\varphi}{2\pi F},$$

результаты запишите в табл. 1.9.

В программе MicroCAP измерьте сдвиги по времени  $\Delta t_M$  между соответствующими сигналами и V(1) по временным диаграммам, полученным в результате моделирования, результаты представьте в табл. 1.8, сделайте выводы.

Связь между временными диаграммами гармонических сигналов, сдвигами фаз и временными сдвигами между ними показана на рис. 1.16, где показаны три гармонических колебания.

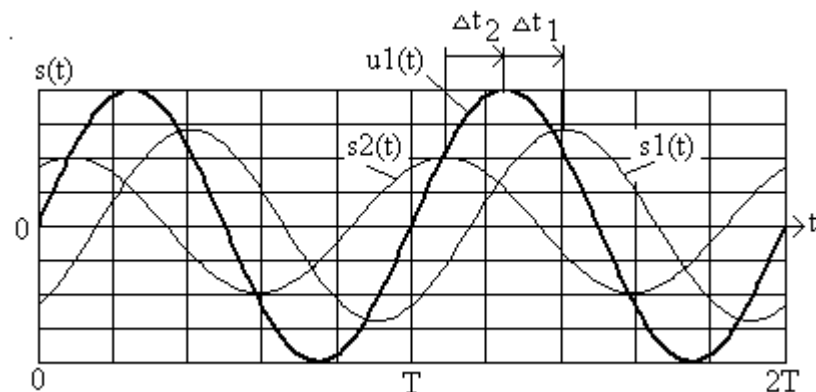


Рис. 1.16

**Опорный** сигнал  $u1(t)$  отмечен жирной линией, имеет наибольшую амплитуду и записывается в виде

$$u1(t) = U_0 \cos(\omega t + \psi_0).$$

Это колебание на рис. 1.10 имеет начальную фазу  $\psi_0 = -\pi/2$ .

Колебание  $s1(t)$  в пределах половины периода смещено вправо (**позже** по времени) на интервал  $\Delta t_1 > 0$  и имеет вид

$$s1(t) = S_1 \cos(\omega t + \psi_1) = S_1 \cos[\omega(t - \Delta t_1) + \psi_0].$$

Тогда для начальной фазы получим

$$\psi_1 = -\omega \cdot \Delta t_1 + \psi_0,$$

а для сдвига фаз  $\varphi$  между сигналом  $s1(t)$  и опорным колебанием  $u1(t)$

$$\varphi = \psi_1 - \psi_0 = -\omega \cdot \Delta t_1.$$

Как видно, для сигнала  $s1(t)$  сдвиг фаз  $\varphi < 0$ , то есть он отстает по фазе от опорного сигнала.

Аналогично сигнал  $s2(t)$  в пределах половины периода смещен влево (**раньше** по времени) на интервал  $\Delta t_2 < 0$ , при этом сдвиг фаз  $\varphi = \psi_1 - \psi_0 = -\omega \cdot \Delta t_2 > 0$ , то есть  $s2(t)$  опережает по фазе опорное напряжение  $u1(t)$ .

Величины  $\Delta t_M$  для токов  $I(R1)$  и  $I(C1)$  в **наносекундах** внесите в АККОС-МВ (**Тема 10**): **тема 10, ответы 3 и 4 соответственно.**

Проведите схемотехническое моделирование цепи в программе WorkBench (пример показан на рис. 1.17). Подключите к цепи осциллограф и получите временные диаграммы напряжений генератора и на емкости, измерьте сдвиг во времени между напряжением на емкости и сигналом генератора и определите сдвиг фаз между ними. Сравните результаты с полученными ранее.

1.8.3. В программе MicroCAP соберите схему с источником импульсного сигнала, показанную на рис. 1.18.

Задайте  $R1 = (5 + G) \text{ кОм}$ ,  $R2 = (5 + N) \text{ кОм}$  и  $C = (50 + 2N + 10G) \text{ нФ}$ . Частоту повторения импульсов примите равной

$$F = \frac{N + G}{20} \text{ МГц}.$$

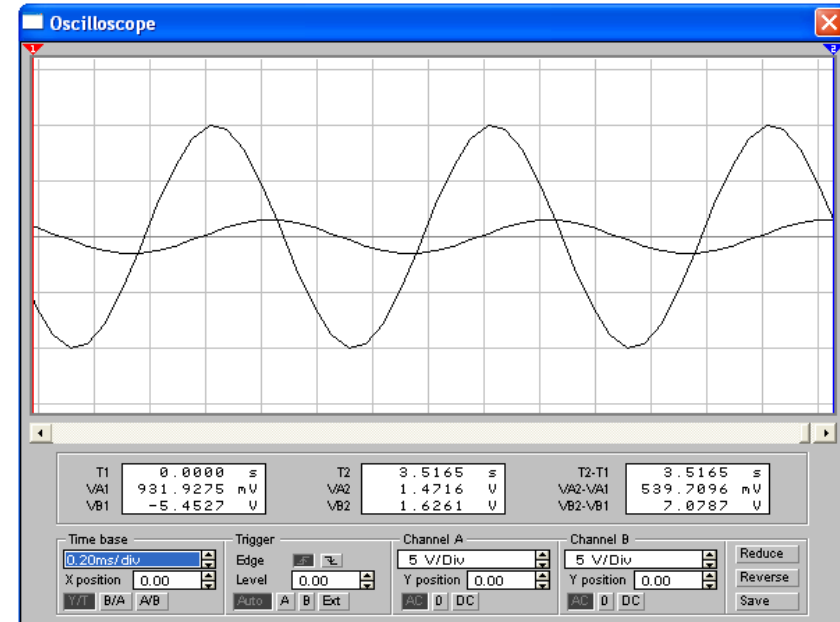
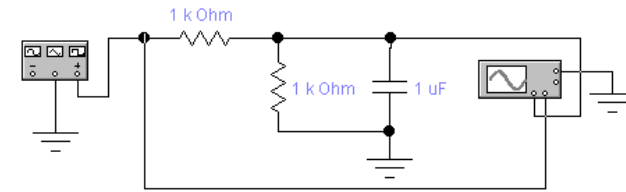


Рис. 1.17

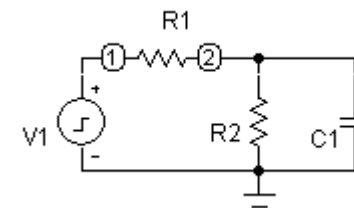


Рис. 1.18

Установите параметры последовательности **прямоугольных** импульсов с длительностью, равной половине периода - **меандра** (рис. 1.6) в соответствии с табл. 1.10 (вариант 1). Примите низкий уровень напряжения ( $V_{ZERO}$ ) равным 0 и высокий уровень импульса ( $V_{ONE}$ ) равным  $A = \sqrt{N \cdot G \cdot B}$ . Получите временные диаграммы напряжений в узлах 1 и 2, и токов в сопротивлениях R1, R2 и емкости C, приведите в отчете соответствующий графики.

Таблица 1.10

Вариант	Параметр				
	P1	P2	P3	P4	P5
1	0	0	$T/2$	$T/2$	$T$
2	0	0	$T/10$	$T/10$	$T$

Период  $T_1$  повторения импульсов напряжения на емкости  $u_{C1}$  для варианта 1 в **наносекундах** внесите в АККОС-МВ (**Тема 10**): **тема 10, ответ 6.**

Установите параметры импульса в соответствии с вариантом 2 в табл. 1.10, получите временные диаграммы напряжений в узлах 1 и 2, и токов в сопротивлениях R1, R2 и емкости C, приведите в отчете соответствующие графики. Проведите анализ изменений в полученных временных диаграммах.

Период  $T_2$  повторения импульсов напряжения на емкости  $u_{C1}$  для варианта 2 в **наносекундах** внесите в АККОС-МВ (**Тема 10**): **тема 10, ответ 6.**

Проведите схемотехническое моделирование цепи в программе WorkBench (пример показан на рис. 1.19). Рассмотрите оба импульсных сигнала из табл. 1.10, сравните с результатами, полученными в программе MicroCAP, сделайте выводы.

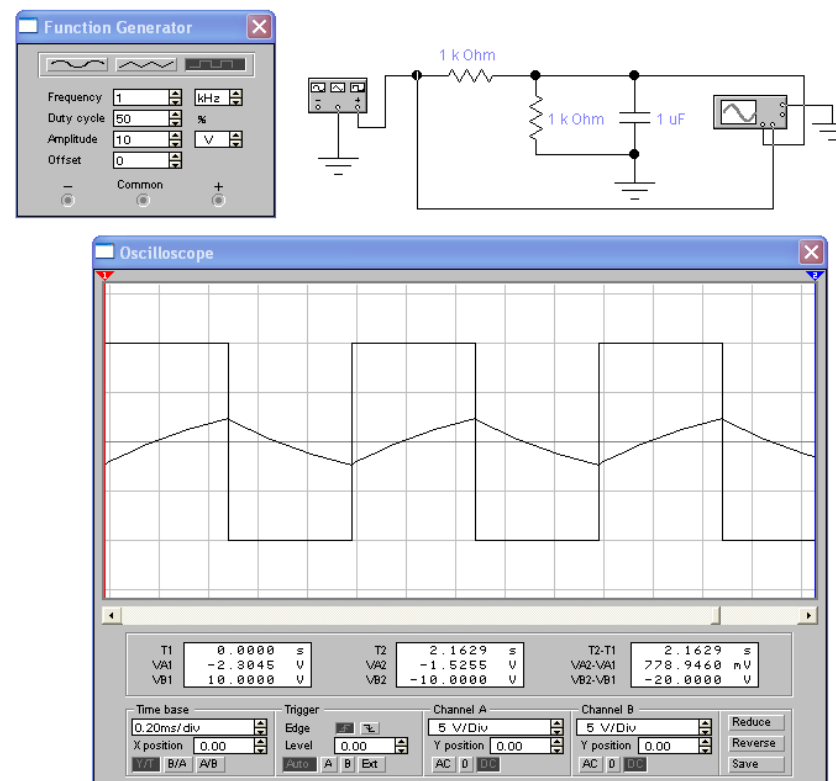


Рис. 1.19

## 1.9. Лабораторная работа №9 «Моделирование простых электронных устройств»

1.9.1. В программе MicroCAP соберите модель электронного усилителя сигнала на базе операционного усилителя (ОУ), показанную на рис. 1.20.

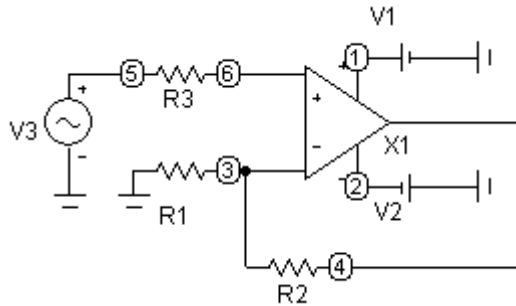


Рис. 1.20

Операционный усилитель, схема которого отдельно показана на рис. 1.21, обеспечивает выполнение операции вида

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = K[u_2(t) - u_1(t)],$$

где  $u_{\text{ВЫХ}}(t)$  - выходное напряжение ОУ,  $u_1(t)$  - напряжение на его инвертирующем, а  $u_2(t)$  - на не инвертирующем входах,  $K$  - коэффициент усиления ОУ,  $E$  - двухполярное напряжение питания ОУ (обычно от  $\pm 3\text{В}$  до  $\pm 30\text{В}$ ).

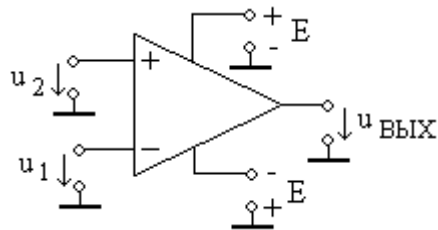


Рис. 1.21

Для ОУ характерно высокое (для **идеального ОУ - бесконечное**) значение коэффициента усиления  $K$ , высокое входное и очень низкое выходное сопротивление.

В схеме на рис. 1.20 использовано неинвертирующее включение ОУ, при котором коэффициент усиления  $K_y$  устройства равен

$$K_y = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1},$$

а сдвиг фаз между выходным и входным гармоническими напряжениями равен нулю,  $U_{\text{ВХ}}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$  - амплитуды входного и выходного сигналов.

В модели на рис. 1.20 выберите тип ОУ (например, GENERIC), установите уровень модели LEVEL=1, задайте  $R1 = R3 = (5 + G) \text{ кОм}$ ,  $R2 = (50 + 10 \cdot N) \text{ кОм}$ , частоту источника гармонического сигнала примите равной

$$F = \frac{N + G}{20} \text{ кГц}$$

с амплитудой **1 мВ**.

В режиме анализа переходных процессов проведите моделирование, получите временные диаграммы входного V(5) и выходного V(4) напряжений, напряжений питания V(1) и V(2), приведите их в отчете.

Измерьте по временным диаграммам период  $T$  колебаний выходного напряжения и внесите его значение в **микросекундах** в АККОС-МВ (**Тема 11**): **тема 11, ответ 1**.

Определите амплитуды  $U_{\text{ВХ}}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$  - входного и выходного напряжений, получите коэффициент усиления по результатам моделирования

$$K_{y \text{ МОД1}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

Значение  $10 \cdot K_{y \text{ МОД1}}$  введите в АККОС-МВ (**Тема 11**): **тема 11, ответ 2**.

Вычислите величину коэффициента усиления

$$K_{y1} = 1 + \frac{R_2}{R_1},$$

сравните ее с  $K_{y \text{ МОД } 1}$ , сделайте выводы.

Увеличьте сопротивление  $R_2$  в два раза. Определите амплитуды  $U_{BX}$  и  $U_{BЫX}$  вычислите коэффициент усиления по результатам моделирования

$$K_{y \text{ МОД } 2} = \frac{U_{BЫX}}{U_{BX}}.$$

Значение  $10 \cdot K_{y \text{ МОД } 2}$  введите в АККОС-МВ (Тема 11): **тема 11, ответ 3.**

Проведите схемотехническое моделирование усилителя на базе ОУ в программе WorkBench (пример показан на рис. 1.22), выбрав идеальную модель ОУ и параметры, заданные для модели в MicroCAP. Проведите моделирование, опишите в отчете результаты.

Замените идеальную (трехвыводную) модель ОУ на модель с источниками питания (пятивыводную), как показано на рис. 1.23, проведите моделирование, сравните результаты с моделью вида рис. 1.22.

Увеличьте уровень входного напряжения, добейтесь получения заметных нелинейных искажений, как показано на рис. 1.23, сделайте выводы.

1.9.2. В программе MicroCAP соберите модель усилителя с инвертирующим включением ОУ, показанную на рис. 1.24.

В схеме на рис. 1.24 коэффициент усиления  $K_y$  равен

$$K_y = \frac{U_{BЫX}}{U_{BX}} = -\frac{R_2}{R_1},$$

а сдвиг фаз между выходным и входным гармоническими напряжениями равен  $180^\circ$ .

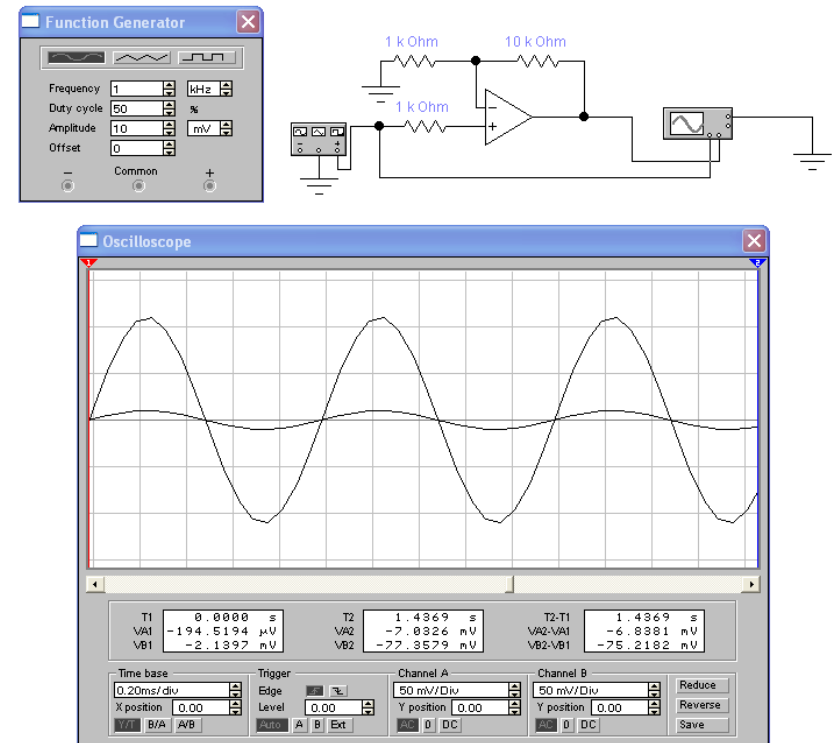


Рис. 1.22

В режиме анализа переходных процессов получите временные диаграммы входного  $V(3)$  и выходного  $V(5)$  напряжений, напряжений питания  $V(1)$  и  $V(2)$ , приведите их в отчете. Определите амплитуды входного и выходного напряжений, найдите коэффициент усиления по результатам моделирования (модуль коэффициента усиления)

$$K_{y \text{ МОД } 3} = \frac{U_{BЫX}}{U_{BX}}.$$

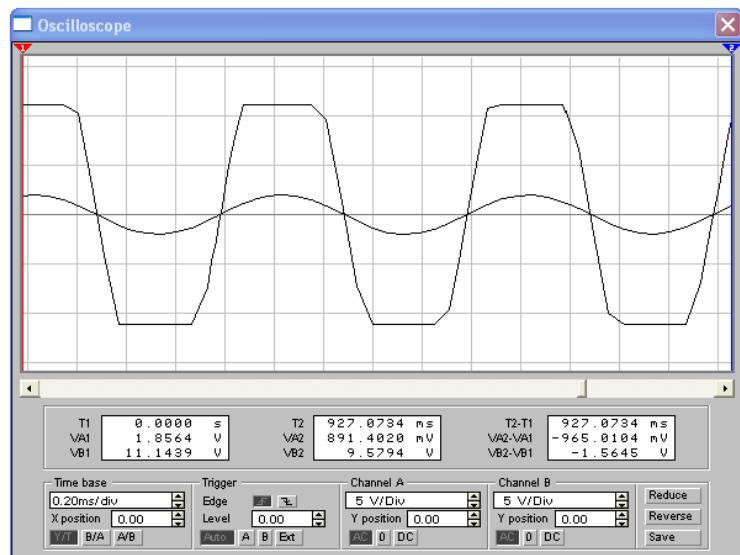
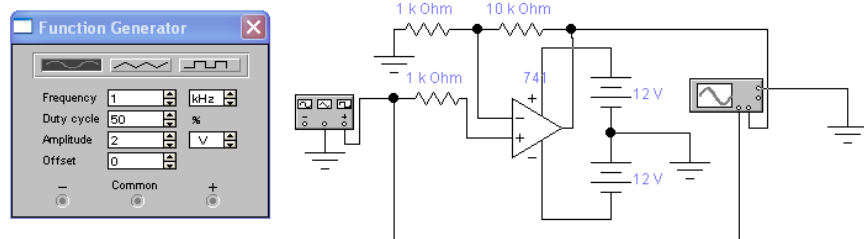


Рис. 1.23

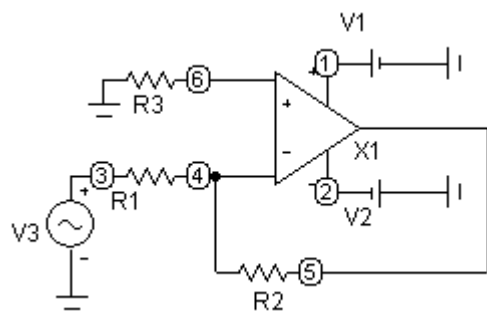


Рис. 1.24

Значение  $10 \cdot K_{y \text{ МОД}3}$  введите в АККОС-МВ (Тема 11):  
тема 11, ответ 4.

1.9.3. Соберите цепь, показанную на рис. 1.25а, содержащую источник гармонического сигнала и электронное устройство, которое называют «триггер Шмидта» (это макрос с именем Schmitt). Его передаточная характеристика по постоянному току  $u_{\text{ВЫХ}}(u_{\text{ВХ}})$  гистерезисного типа показана на рис. 1.25б и описывается четырьмя основными параметрами модели  $x1 = U'$ ,  $x2 = U''$ ,  $y1 = U_1$  и  $y2 = U_2$ , стрелки показывают направление изменения входного напряжения.

Отечественная промышленность выпускает интегральные схемы триггеров Шмидта с однополярным питанием, например, К561ТЛ1 (зарубежный аналог CD4093), К155ТЛ1, К155ТЛ2 (зарубежный аналог 7414).

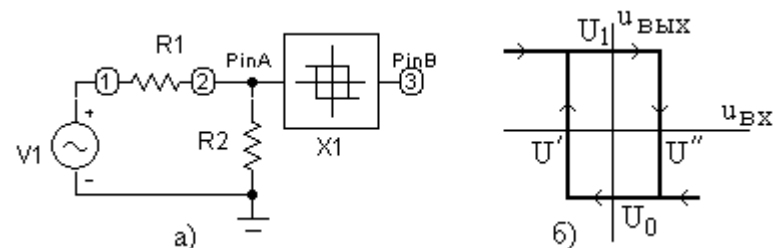


Рис. 1.25

Задать  $R1 = (5 + G) \text{ кОм}$ ,  $R2 = (5 + N) \text{ кОм}$  и параметры триггера Шмидта

$$x1 = -\frac{20 + G + N}{20} \text{ В}, \quad x2 = \frac{20 + G + N}{20} \text{ В},$$

$$y1 = -\frac{80 + 4 \cdot G + N}{20} \text{ В}, \quad y2 = \frac{80 + 4 \cdot G + N}{20} \text{ В}.$$



Частоту источника примите равной

$$F = \frac{N + G}{20} \text{ МГц},$$

а амплитуду колебаний установите 20 В.

Проведите моделирование, получите временные диаграммы напряжений в узлах 1, 2 и 3, приведите их в отчете, объясните их поведение, сделайте выводы.

По временным диаграммам определите частоту повторения импульсов в **килогерцах** и внесите ее значение в АККОС-МВ (**Тема 11**): **тема 11, ответ 6**.

Измерьте размах напряжения на выходе триггера Шмидта (в узле 3) в **милливольтгах** и введите в АККОС-МВ (**Тема 11**): **тема 11, ответ 6**.

#### 1.10. Дополнительные задания

1.10.1. Постройте модель электронного генератора импульсов на базе триггера Шмидта (интегральной схемы CD4093), показанную на рис. 1.16.

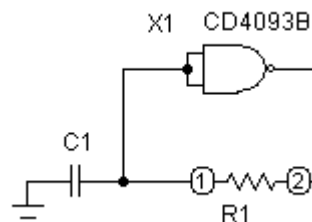


Рис. 1.26

По умолчанию в модель интегральной схемы заложено напряжение однополярного питания +5 В.

Задайте  $R1 = (5 + G) \text{ кОм}$  и  $C1 = (50 + 2N + 10G) \text{ нФ}$ .

В режиме анализа переходных процессов получите временные диаграммы напряжений в узлах 1 и 2, приведите их в отчете. Проанализируйте полученные результаты, опишите работу генератора, сделайте выводы.

1.10.2. Методами схемотехнического моделирования проведите анализ воздействия переменных сигналов (гармонических колебаний или последовательности прямоугольных импульсов) на простую электрическую цепь. Рассмотрите токи и напряжения в элементах цепи, проанализируйте результаты.

1.10.3. Проведите схемотехническое моделирование выбранного Вами (например, из [3]) электронного устройства.

1.10.4. Оформите соответствующий отчет, при необходимости обратитесь за консультацией к преподавателю.

## 2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

### 2.1. Практическое занятие №1 «Вводное, язык MathCAD»

Перечень тем практических занятий по учебной дисциплине приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1.

№	Тема практического занятия
1	Вводное, язык MathCAD.
2	Программирование в MathCAD.
3	Представление результатов в MathCAD.
4	Системы WorkBench и MicroCAP.
5	Модели элементов в WorkBench и MicroCAP.
6	Моделирование цепей постоянного тока в WorkBench и MicroCAP.
7	Моделирование цепей гармонического тока в WorkBench и MicroCAP.
8	Моделирование простых электронных устройств.
9	Заключительное.

Задания предназначены для использования на практических занятиях и при самостоятельной работе.

**В индивидуальных заданиях  $G$  - номер группы,  $N$  - номер студента в списке группы.**

#### 2.1.1. Присвойте переменной:

- 1)  $a$  значение 2,5;
- 2)  $N$  значение 5;
- 3)  $b$  значение 257,4.

#### 2.1.2. Вычислите значения:

- 1)  $b = \pi / 2$ ;
- 2)  $c = 2,5 \cdot 4 / 5$ ;
- 3)  $d = 2 + 2 \cdot 2$ ;
- 4)  $b = 1 / \sqrt{2}$ ;
- 5)  $c = 2/3 + 1/3$ ;
- 6)  $d = \sqrt[4]{16}$ .

Величину  $a = 100 \cdot \sqrt[G+2]{N^2}$  введите в АККОС-МВ

(Тема 15): тема 15, ответ 1.

#### 2.1.3. Задайте вектор (набор) чисел:

- 1)  $a = 0, 1, 2 \dots 10$ ;
- 2)  $B = 10, 9, 8 \dots 0$ ;
- 3)  $c = 0, 2, 4 \dots 10$ ;
- 4)  $D = 10, 8, 6 \dots - 4$ ;

#### 2.1.4. Создайте матрицы

$$1) A = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \dots \\ 10 \end{bmatrix};$$

$$2) B = [0 \quad 2 \quad \dots \quad 10];$$

$$3) C = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 6 \\ 4 & 5 & 6 & 7 \end{bmatrix}.$$

#### 2.1.6. Вычислите функции:

- 1)  $y(t) = 5 \cdot \sin(1000 \cdot t)$  при  $t = 0,01$ ;
- 2)  $y(t) = 50 \cdot \cos(1000 \cdot t - \pi/6)$  при  $t = -0,01$ ;
- 3)  $y(t) = 10 \cdot \cos(1000 \cdot t - 45^\circ)$  при  $t = 0,02$ ;

4)  $y(t) = 5 \cdot \exp(10 \cdot t)$  при  $t = -0,1$ ;

5)  $y(t) = 5 \cdot \exp(-10 \cdot t)$  при  $t = 0,1$ ;

6)  $y(t) = 5 \cdot \lg(10 \cdot t)$  при  $t = 0,1$ ;

7)  $y(t) = 5 \cdot \log_4(100 \cdot t)$  при  $t = 0,1$ ;

Величину  $y(t) = (G + N) \cdot \log_{G+1}((10 \cdot G + 5 \cdot N) \cdot t)$  при  $t = 0,1$  введите в АКОС-МВ (Тема 15): **тема 15, ответ 2.**

2.1.6. Вычислите производные  $\frac{dy(t)}{dt}$  функций:

1)  $y(t) = 5 \cdot \sin(1000 \cdot t)$  при  $t = 0,01$ ;

2)  $y(t) = 10 \cdot \cos(1000 \cdot t - 45^\circ)$  при  $t = 0,02$ ;

3)  $y(t) = 5 \cdot \exp(-10 \cdot t)$  при  $t = 0,1$ ;

4)  $y(t) = 5 \cdot \lg(10 \cdot t)$  при  $t = 0,1$ ;

5)  $y(t) = 1 \cdot \log_4(160 \cdot t)$  при  $t = 0,1$ .

Производную функции  $y(t) = 10 \cdot G \cdot \exp(-N \cdot t)$  при  $t = 0,1$  введите в АКОС-МВ (Тема 15): **тема 15, ответ 3.**

2.1.7. Вычислите вторые производные  $\frac{d^2y(t)}{dt^2}$  функций:

1)  $y(t) = 5 \cdot \sin(1000 \cdot t)$  при  $t = 0,01$ ;

2)  $y(t) = 10 \cdot \cos(1000 \cdot t - 45^\circ)$  при  $t = 0,02$ ;

3)  $y(t) = 5 \cdot \exp(-10 \cdot t)$  при  $t = 0,1$ ;

4)  $y(t) = 5 \cdot \lg(10 \cdot t)$  при  $t = 0,1$ ;

5)  $y(t) = 1 \cdot \log_4(160 \cdot t)$  при  $t = 0,1$ .

Вторую производную функции  $y(t) = 10 \cdot G \cdot \exp(-N \cdot t)$  при  $t = 0,1$  введите в АКОС-МВ (Тема 15): **тема 15, ответ 4.**

2.1.8. Вычислите интегралы  $\int_0^t y(x)dx$  функций:

1)  $y(t) = 5 \cdot \sin(1000 \cdot x)$  при  $t = 0,01$ ;

2)  $y(t) = 10 \cdot \cos(1000 \cdot x - 45^\circ)$  при  $t = 0,02$ ;

3)  $y(t) = 5 \cdot \exp(-10 \cdot x)$  при  $t = 0,1$ .

Вычислите интеграл  $a = \int_0^t y(x)dx$  от функции

$y(x) = 10 \cdot G \cdot \exp(-N \cdot x)$  при  $t = 0,1$ . Величину  $1000 \cdot a$  введите в АКОС-МВ (Тема 15): **тема 15, ответ 5.**

2.1.9. Вычислите суммы и произведения:

1)  $s = \sum_{n=0}^{10} [2 + 3 \cdot n]$ ;

2)  $s = \sum_{n=1}^4 [1 + 2^n]$ ;

3)  $s = \sum_{n=0}^3 [2 + 3 \cdot n^2]$ ;

4)  $P = \prod_{m=1}^5 (1 + m)$ ;

5)  $P = \prod_{m=1}^5 (1 + m^2)$ .

Величину  $s = \sum_{n=0}^{G+5} [N + 10 \cdot n]$  введите в АКОС-МВ (Тема 15): **тема 15, ответ 6.**

2.2. Практическое занятие №2 «Программирование в MathCAD»

2.2.1. Используя оператор if:

1) вычислите величину  $a$ , равную -1, если  $x < 0$  и 1 при  $x \geq 0$  (знаковая функция);

2) вычислите величину  $b$ , равную 0 при  $x > 2$  и 5 в противном случае.

Вычислите величину  $c$ , равную  $(N + G)$ , если  $\sin(10 \cdot G + 5 \cdot N) \geq 0$  и  $(N - G)$  в противном случае. Значение

10·с введите в АКОС-МВ (Тема 16): тема 16, ответ 1.

2.2.2. С помощью оператора for:

1) используя цикл for, вычислите сумму

$$s = \sum_{n=0}^{10} [2 + 3 \cdot n];$$

2) аналогично вычислите  $s = \sum_{n=1}^4 [1 + 2^n]$ ;

С помощью цикла for вычислите сумму

$$s = \sum_{n=0}^{G+4} [N + 5 \cdot n]$$
 введите в АКОС-МВ (Тема 16): тема 16,

ответ 2.

2.2.3. Применяя оператор while:

1) вычислите сумму целых чисел от 1 до  $M$ , при

котором  $\sin\left[\frac{M}{10}\right]$  станет меньше 0;

2) вычислите произведение целых чисел от 1 до  $M$ , при котором  $(M^2 - 100)$  величина положительна.

Вычислите сумму  $P$  целых чисел от 1 до  $M$ , пока зна-

чение  $\sin\left[\frac{\exp(\sqrt{M})}{100 + 98 \cdot \sin(N + G)}\right]$  остается положительным.

Величину  $P$  введите в АКОС-МВ (Тема 16): тема 16,

ответ 3.

2.2.4. Решите задачу: на банковский счет был сделан начальный вклад  $S_0$  рублей и затем он ежемесячно увеличивался на  $S_1$  рублей, пока общая сумма не стала равной  $S$  рублей при

$$S_1 = 1000 \cdot (1,5 + \sin(N + G)), \quad S = 10000 \cdot \sqrt{10 + G \cdot N}.$$

Определите начальный вклад  $S_0$  и число месяцев  $N$ , в течение которых он пополнялся:

- 1) проведите расчет, используя функции floor(x) (максимальное целое число, меньшее x) и mod(y,x) (остаток от деления y на x);
- 2) используйте для расчета программу с оператором while.

Величины  $S_0$  и  $N$  введите в АКОС-МВ (Тема 16): тема 16, ответы 4 и 5 соответственно.

2.2.6. Решите уравнение

$$F(x) = e^{\left(\frac{N+3 \cdot G}{5}\right)x} + e^{\left(\frac{N+3 \cdot G}{10}\right)x} - \sqrt{N + G} = 0,$$

используя функцию root(F(x),x), найдите действительный корень  $x_1$ . Величину  $1000 \cdot x_1$  введите в АКОС-МВ (Тема 16): тема 16, ответ 6.

2.2.6. Напишите программу, с помощью цикла for формирующую таблицу умножения (сложения, вычитания) двух целых чисел от 0 до 9 в виде квадратной матрицы произведений (сумм, разностей).

2.3. Практическое занятие №3 «Представление результатов в MathCAD»

2.3.1. Постройте в декартовых координатах на одном рисунке графики функций времени  $y_1(t) = 5 \cdot \cos(1000 \cdot t)$  (опорный сигнал) и  $y_2(t) = 5 \cdot \sin(1000 \cdot t)$  на интервале 3-4 периодов. Определите сдвиг по времени и сдвиг фаз между ними. Добавьте к ним график функции  $y_3(t) = 2 \cdot \cos(1000 \cdot t - 90^\circ)$ , найдите сдвиг по времени и сдвиг фаз между колебаниями  $y_1(t)$  и  $y_3(t)$ .

Задайте гармоническое колебание

$$s(t) = \sqrt{G \cdot N} \cdot \cos(1000 \cdot t + (5 \cdot G + 2 \cdot N)^0)$$

Определите его амплитуду  $S_m$ , сдвиг по времени  $\Delta t$  в **миллисекундах** между сигналами  $y_1(t)$  и  $s(t)$  и сдвиг фаз в градусах  $\varphi_{y_1,s}$  между ними. Значения  $100 \cdot S_m$ ,  $\Delta t$  в **миллисекундах** и  $\varphi_{y_1,s}$  в **градусах** введите в АКОС-МВ (**Тема 17**): **тема 17, ответы 1, 2 и 3 соответственно.**

2.3.2. Постройте график функции времени  $y(t) = 5 \cdot \sin(10^6 \cdot t)$  на интервале 3-4 периодов, сравните с предыдущими графиками.

2.3.3. Изобразите график экспоненты  $y_4(t) = \exp(100 \cdot t)$  в положительной и отрицательной областях оси времени, выберите подходящий масштаб, попробуйте несколько вариантов. Добавьте график  $y_5(t) = \exp(-100 \cdot t)$ , сравните результаты.

Значение  $y_4(t) = 100 \cdot \exp(100 \cdot t)$  при

$$t = \frac{1}{50(2 + \sin(N + G))}$$

введите в АКОС-МВ (**Тема 17**): **тема 17, ответ 4.**

2.3.4. Постройте график логарифмической функции  $y(x) = \log_2(x)$ , выберите масштаб изменения переменной, отображающий ход кривой.

Значение  $y(x) = 100 \cdot \log_{G+1}(x)$  при

$$x = 500(2 + \sin(N + G))$$

введите в АКОС-МВ (**Тема 17**): **тема 17, ответ 5.**

2.3.6. Постройте график функции, заданной параметрически в виде

$$x(t) = 10 \cdot \cos(1000 \cdot t), \quad y(t) = 10 \cdot \sin(1000 \cdot t).$$

Выберите интервал переменной  $t$ , отображающий ход кривой, объясните ее вид. Постройте кривые

$$x(t) = 10 \cdot \cos(1000 \cdot t), \quad y(t) = 1 \cdot \sin(1000 \cdot t),$$

$$x(t) = 10 \cdot \cos(1000 \cdot t), \quad y(t) = 10 \cdot \sin(1000 \cdot t),$$

Постройте график функции

$$x(t) = G \cdot \cos((20 \cdot G + 5 \cdot N) \cdot t),$$

$$y(t) = G \cdot \sin((20 \cdot G + 5 \cdot N) \cdot t)$$

на интервале времени от 0 до значения  $t_1$ , при котором **первый** раз достигается точка с координатами  $x(t_1) = -G$ ,  $y(t_1) = 0$ . Величину  $t_1$  в **миллисекундах** введите в АКОС-МВ (**Тема 17**): **тема 17, ответ 6.**

2.3.6. Постройте график параметрически заданной функции вида

$$x(t) = 1 \cdot \sin(1000 \cdot t), \quad y(t) = 10 \cdot \exp(100 \cdot t).$$

Выберите несколько интервалов переменной  $t$ , объясните вид кривых.

2.3.7. Постройте в полярных координатах график функции

$$\rho(x) = x, \quad \theta(x) = x,$$

выберите несколько интервалов переменной  $t$ , рассмотрите вид кривых.

2.3.8. Постройте в полярных координатах графики функции

$$\rho(x) = \sin(x), \quad \theta(x) = x;$$

$$\rho(x) = \sin(2 \cdot x), \quad \theta(x) = x;$$

$$\rho(x) = \sin(10 \cdot x), \quad \theta(x) = x,$$

выберите несколько интервалов переменной  $t$ , рассмотрите вид кривых.

2.3.9. Постройте двумерный график (поверхность), описываемый функцией двух переменных

$$f(x, y) = x + y.$$

Опишите форму поверхности. Как она изменится для функции

$$f(x, y) = x - y.$$

Рассмотрите возможностями **цветового описания** значений функции на графике поверхности.

2.3.10. Постройте седлообразную поверхность вида

$$f(x, y) = x^2 - y^2,$$

опишите ее свойства.

2.4. Практическое занятие №4 «Системы WorkBench и MicroCAP»

2.4.1. Рассмотрите состав элементов меню систем MicroCAP и WorkBench. Рассмотрите возможности выбора элементов цепи, формирования ее схемы, получения результатов моделирования и передачи их в текстовые и графические редакторы.

2.4.2. Изучите описание моделей простейших источников напряжения (постоянного, гармонического, импульсного).

2.4.3. Рассмотрите описание простых пассивных элементов цепи (сопротивления, индуктивности и емкости).

2.4.4. В MicroCAP построите на экране простейшую модель, показанную на рис. 2.1 с источником постоянного напряжения 12 В и сопротивлением 1 кОм. Выберите режим «Расчет по постоянному току, выведите результаты моделирования напряжения, тока и мощности. Проведите расчет этих величин на основе закона Ома, сравните результаты.

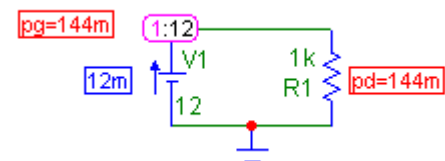


Рис. 2.1

Как видно, напряжение в узле 1 равно 12 В (напряжению источника), ток равен 12 мА, а мощность, отдаваемая источником (pg) и мощность, потребляемая сопротивлением (pd) равны 144 мВт.

2.4.6. Установите в цепи рис. 2.1 напряжение источника V1 равным  $\sqrt{G \cdot N}$  В и сопротивление  $R1 = 100 \cdot (1,2 + \sin(N + G))$  Ом.

Определите напряжение V1 в узле 1, ток I в цепи и мощность P, потребляемую в сопротивлении.

Значения V1 в **милливольтгах**, I в **миллиамперах** и P в **милливаттах** введите в АККОС-МВ (Тема 18): **тема 18, ответы 1, 2 и 3 соответственно.**

2.4.7. В программе WorkBench соберите схему на рис. 2.2, проведите моделирование, проанализируйте результаты, применив закон Ома.

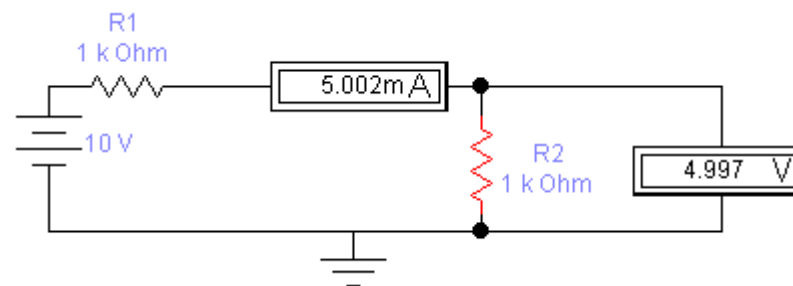


Рис. 2.2

2.4.8. В программе MicroCAP установите в цепи рис. 2.1 источник гармонического напряжения, как показано на рис. 2.3. Установите амплитуду колебаний  $A=1$  В и выберите модель источника с частотой  $F=1$  МГц.

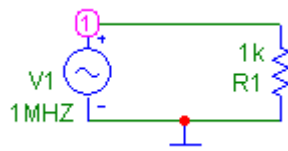


Рис. 2.3

В режиме анализа «Переходные процессы» получите временные диаграммы на интервале 5 периодов и определите период колебаний  $T$ , амплитуду тока в сопротивлении  $I_m(R1)$  и потребляемую им мощность  $P$ .

2.4.9. Задайте в модели цепи рис. 2.3 амплитуду источника напряжения  $V1$   $A = \sqrt{G \cdot N}$  В, частоту колебаний  $F = (20 \cdot G + 10 \cdot N)$  кГц и сопротивление

$$R1 = 100 \cdot (1,2 + \sin(N + G)) \text{ Ом.}$$

По результатам моделирования найдите период колебаний  $T$ , амплитуду  $I_m(R1)$  тока в сопротивлении  $R1$  и потребляемую им мощность  $P$ .

Значения  $T$  в микросекундах,  $I_m(R1)$  в миллиамперах и мощность  $P$  в милливаттах введите в АККОС-МВ (Тема 18): тема 18, ответы 4, 5 и 6 соответственно.

2.4.10. В программе WorkBench соберите схему с источником гармонического сигнала, показанную на рис. 2.4, проведите моделирование, проанализируйте временные диаграммы.

Замените сопротивление  $R2$  в схеме рис. 2.4, как показано на рис. 2.6. Проведите моделирование, проанализируйте результаты, сравните с временными диаграммами на рис. 2.4.

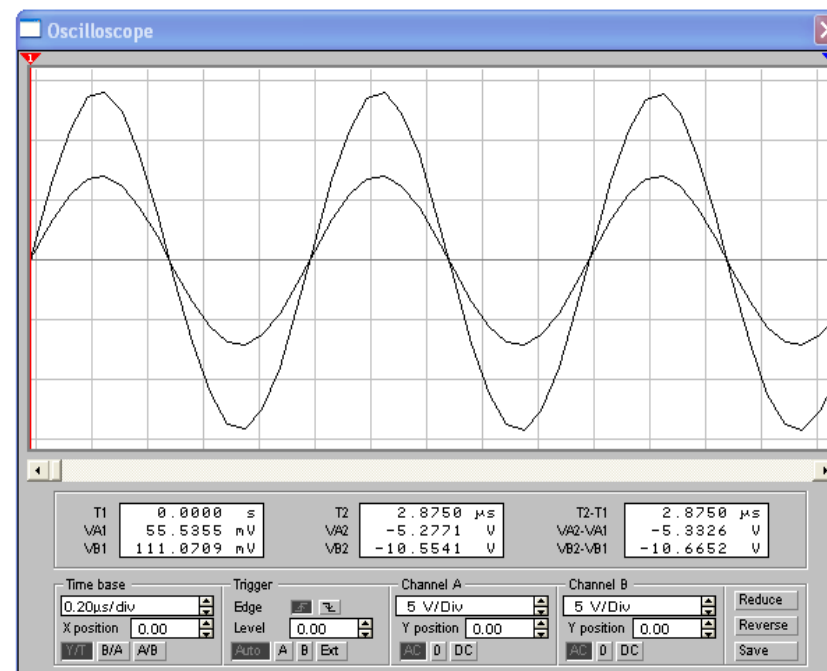
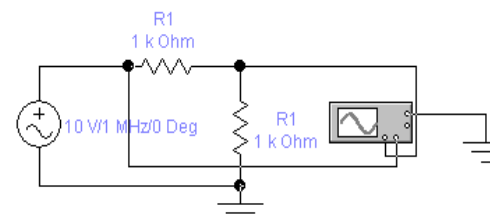


Рис. 2.4

2.4.11 В MicroCAP нажмите на кнопку «Открыть» и в открывшемся каталоге DATA выберите несколько моделей устройств, например, на основе таймера 555. Проведите моделирование, проанализируйте результаты. Измерьте параметры элементов цепи, повторите моделирование, сравните результаты.

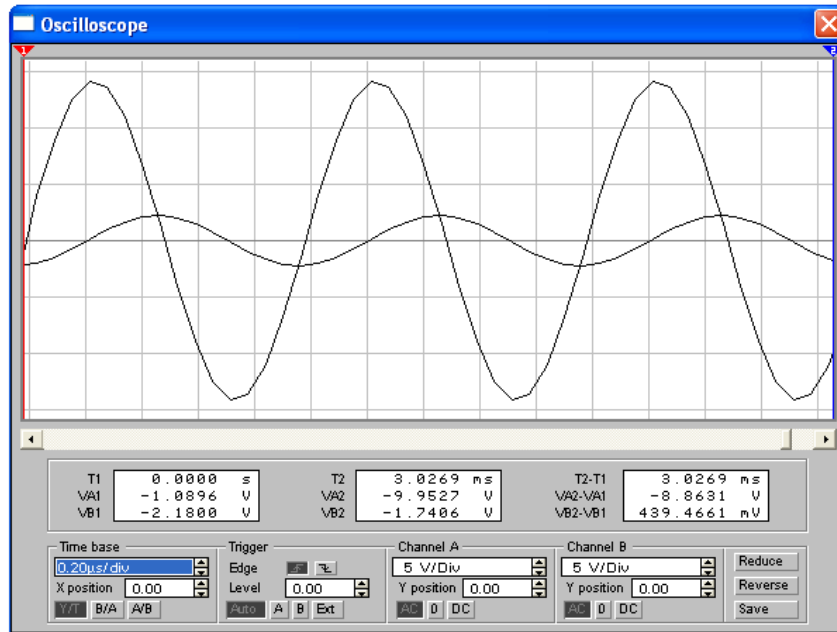
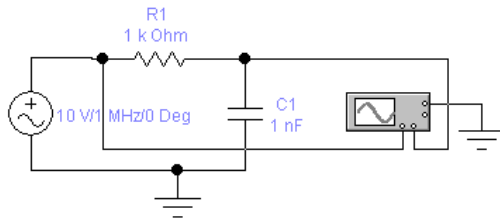


Рис. 2.5

## 2.5. Практическое занятие №5 «Модели элементов в WorkBench и MicroCAP»

2.5.1. Рассмотрите меню компонент (элементов цепи), включенных в пакеты WorkBench и MicroCAP. Ознакомьтесь с составом аналоговых и цифровых компонент, рассмотрите параметры наиболее простых элементов.

2.5.2. Изучите основные параметры источников постоянного, гармонического и импульсного напряжений.

2.5.3. В пакете MicroCAP соберите модель с гармоническим источником, показанную на рис. 2.3 при указанных для него параметрах  $A=1$  и  $F=1$  МГц. Установите начальную фазу PH колебаний равной

$$PH = (3 \cdot G + 2 \cdot N)^0$$

(обратите внимание, что начальная фаза вводится в радианах и нулевой начальной фазе соответствует функция  $\sin$ ). Как изменилась временная диаграмма напряжения источника, определите ее смещение  $\Delta t_1$  во времени. Величину  $\Delta t_1$  в **наносекундах** введите в АККОС-МВ (Тема 19): **тема 19, ответ 1.**

Задайте амплитуду колебаний  $A = \sqrt{G \cdot N}$  В, частоту  $F = (20 \cdot G + 10 \cdot N)$  кГц и начальную фазу PH колебаний равной

$$PH = 50 \cdot (1,1 + \cos(N + G))^0,$$

проведите моделирование. По временной диаграмме определите **размах** напряжения источника  $\Delta A$  и введите его значение в АККОС-МВ (Тема 19): **тема 19, ответ 2.**

Найдите смещение во времени  $\Delta t_2$  рассматриваемого сигнала синусоидальной формы относительно напряжения с нулевой начальной фазой и внесите его в **наносекундах** в АККОС-МВ (Тема 19): **тема 19, ответ 3.**

Установите новое значение начальной фазы

$$PH = -50 \cdot (1,1 + \sin(N + G))^0.$$

Аналогично предыдущему определите смещение во времени  $\Delta t_3$  полученного сигнала синусоидальной формы относительно напряжения с нулевой начальной фазой и внесите его в **наносекундах** в АККОС-МВ (Тема 19): **тема 19, ответ 4.**

2.5.4. В пакете WorkBench соберите модель, показанную на рис. 2.4, **повторите** моделирование по пункту 2.5.3.



2.5.5. В MicroCAP постройте модель цепи с импульсным источником сигнала, показанную на рис. 2.6.

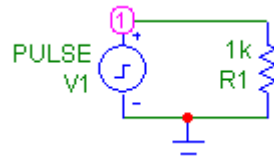


Рис. 2.6

Частоту повторения импульсов примите равной

$$F = \frac{N + G}{20} \text{ МГц.}$$

Установите параметры последовательности **прямоугольных** импульсов с длительностью, равной половине периода - **меандра** в соответствии с табл. 2.1 (вариант 1). Примите низкий уровень напряжения (VZERO) равным  $A = -\sqrt{N \cdot G} B$  и высокий уровень импульса (VONE) равным  $A = \sqrt{N \cdot G} B$ . Получите временную диаграмму напряжения источника в узле 1 и тока  $i(R1)$  в сопротивлении  $R1$ .

Таблица 2.1.

Вариант	Параметр				
	P1	P2	P3	P4	P5
1	0	0	$T/2$	$T/2$	$T$
2	0	0	$T/10$	$T/10$	$T$

53

Период  $T_1$  повторения импульсов **тока** в сопротивлении  $i(R1)$  для варианта 1 в **наносекундах** и его размах  $\Delta i$  в **микроамперах** внесите в АККОС-МВ (Тема 19): **тема 19, ответы 5 и 6 соответственно.**

63

Установите параметры импульса в соответствии с вариантом 2 табл. 2.1. Получите временные диаграммы напряжения источника и тока в сопротивлении  $R1$ .

2.5.6. В пакете WorkBench постройте модель, показанную на рис. 2.7.

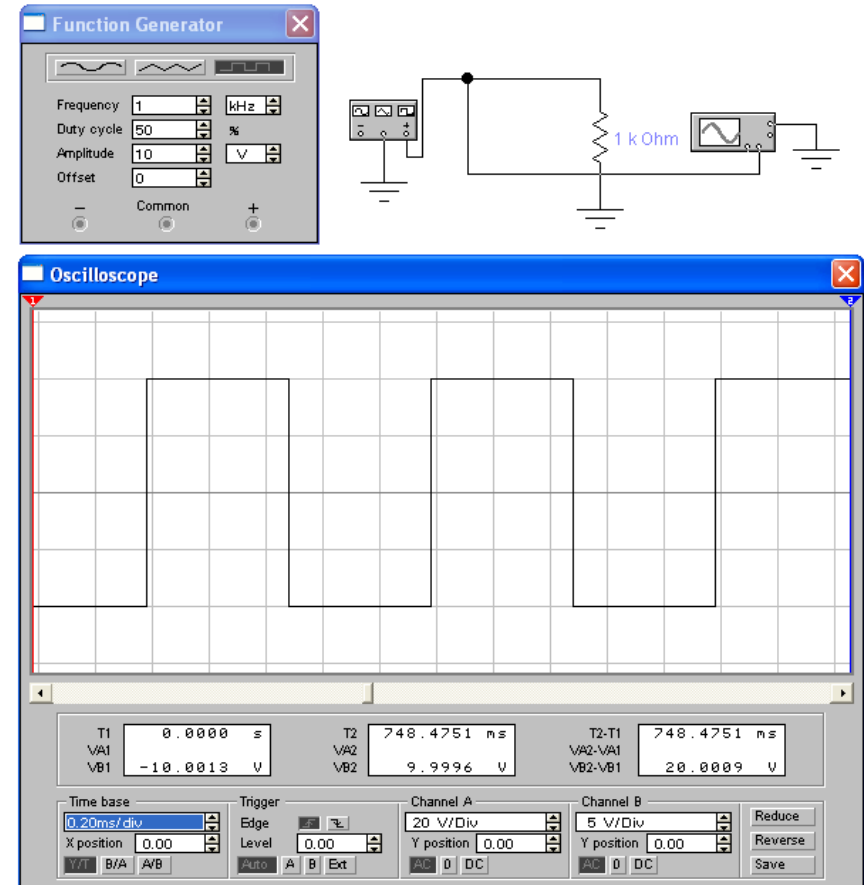


Рис. 2.7

Проведите моделирование при разной скважности импульсов, опишите полученные результаты.

64

2.5.7. Рассмотрите наиболее важные параметры моделей пассивных элементов цепи (сопротивления, индуктивности и емкости).

2.5.8. Познакомьтесь с важнейшими параметрами активных элементов цепи (диодов, транзисторов, интегральных схем).

## 2.6. Практическое занятие №6 «Моделирование цепей постоянного тока в WorkBench и MicroCAP»

2.6.1. Соберите резистивную цепь с источником постоянного напряжения  $V1 = 12$  В и двумя последовательно соединенными сопротивлениями  $R1 = R2 = 100$  Ом, показанную на рис. 2.8.

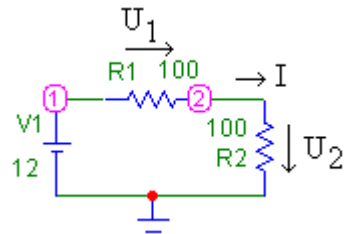


Рис. 2.8

Проведите анализ (моделирование) в режиме «Расчет по постоянному току», включив определение тока и мощностей. Результат моделирования показан на рис. 2.9.

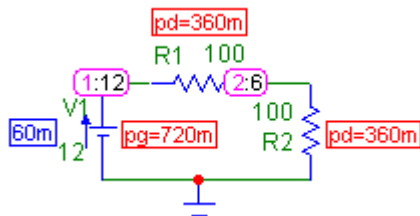


Рис. 2.9

Проведите расчет тока в цепи и мощности, потребляемой сопротивлениями, сделайте выводы.

2.6.2. Увеличьте в два раза напряжение источника и повторите моделирование. Объясните полученные результаты.

2.6.3. Увеличьте в два раза сопротивление  $R2$ , повторите моделирование, сделайте выводы.

2.6.4. В программе WorkBench постройте модель, показанную на рис. 2.10.

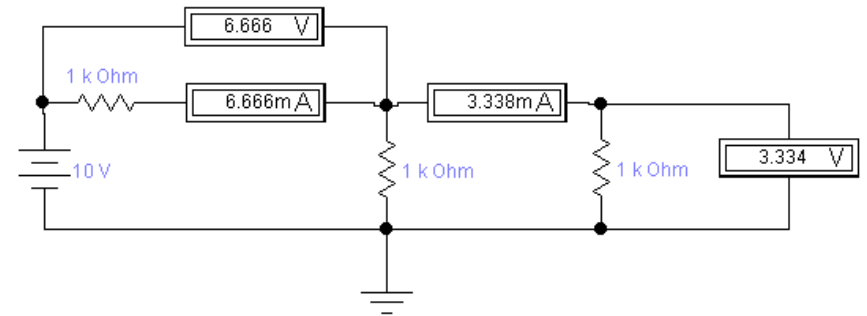


Рис. 2.10

Проведите расчет токов и напряжений на элементах цепи, сделайте соответствующие выводы.

2.6.6. В цепи **рис. 2.8** установите следующие параметры элементов

$$V1 = 4 + G/2 \text{ В}, R1 = (20 + N) \text{ Ом} \text{ и } R2 = (2 + G) \text{ Ом}$$

Проведите моделирование в режиме «Расчет по постоянному току», определите ток  $I$  в цепи, напряжения на сопротивлениях  $U_1$  и  $U_2$ , мощности  $P_1$  и  $P_2$ , потребляемые в сопротивлениях  $R1$  и  $R2$ , и мощность  $P$ , отдаваемую источником.

Проведите расчет указанных величин с помощью закона Ома, сделайте выводы.

Значения тока  $I$  в миллиамперах в цепи на рис. 2.8 внесите в АККОС-МВ (Тема 20): тема 20, ответ 1.

Величины напряжений на сопротивлениях  $U_1$  и  $U_2$  в милливольтмах введите в АККОС-МВ (Тема 20): тема 20, ответы 2 и 3 соответственно.

Полученные значения мощностей  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P$  в милливаттах также занесите в АККОС-МВ (Тема 20): тема 20, ответы 4, 5 и 6 соответственно.

## 2.7. Практическое занятие №7 «Моделирование цепей гармонического тока в WorkBench и MicroCAP»

2.7.1. В программе MicroCAP соберите цепь с гармоническим источником напряжения с амплитудой 1 В и частотой 1 МГц (модель SineSours, 1 MHz), показанную на рис. 2.11, с сопротивлениями  $R1 = R2 = 100$  Ом.

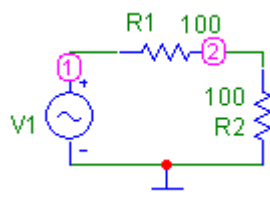


Рис. 2.11

Проведите моделирование в режиме «Переходные процессы», получите временные диаграммы напряжения источника, напряжений на сопротивлениях и отдельно тока в цепи на 3-4 периодах, определите сдвиги фаз между ними. Проанализируйте результаты.

2.7.2. Увеличьте в два раза сопротивление  $R2$ , повторите моделирование, сравните результаты, сделайте выводы.

2.7.3. В цепи рис. 2.11 установите следующие параметры источника

$$A = \sqrt{G \cdot N} B, F = (20 \cdot G + 10 \cdot N) \text{ кГц}$$

и элементов

$$R1 = (20 + N) \text{ кОм} \text{ и } R2 = 10 \cdot (1,2 + \sin(N + G)) \text{ кОм}.$$

Проведите моделирование в режиме «Переходные процессы», определите амплитуду тока  $I_m$  в цепи, амплитуды напряжений на сопротивлениях  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$ , значения мощностей  $P_1$  и  $P_2$ , потребляемых в сопротивлениях  $R1$  и  $R2$ , и мощность  $P$ , отдаваемую источником.

Проведите расчет указанных величин методом комплексных амплитуд с помощью закона Ома, сделайте соответствующие выводы.

Значения амплитуды тока  $I_m$  в микроамперах внесите в АККОС-МВ (Тема 21): тема 21, ответ 1.

Величины амплитуд напряжений на сопротивлениях  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$  в милливольтмах введите в АККОС-МВ (Тема 21): тема 21, ответы 2 и 3 соответственно.

Значения мощностей  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P$  в микроваттах также занесите в АККОС-МВ (Тема 21): тема 21, ответы 4, 5 и 6 соответственно.

2.7.4. В программе WorkBench соберите цепь, показанную на рис. 2.12, получите временные диаграммы напряжений, проведите их анализ.

Проведите расчет этих напряжений методом комплексных амплитуд на основе закона Ома, постройте их графики в пакете MathCAD, сравните с результатами моделирования, сделайте выводы.

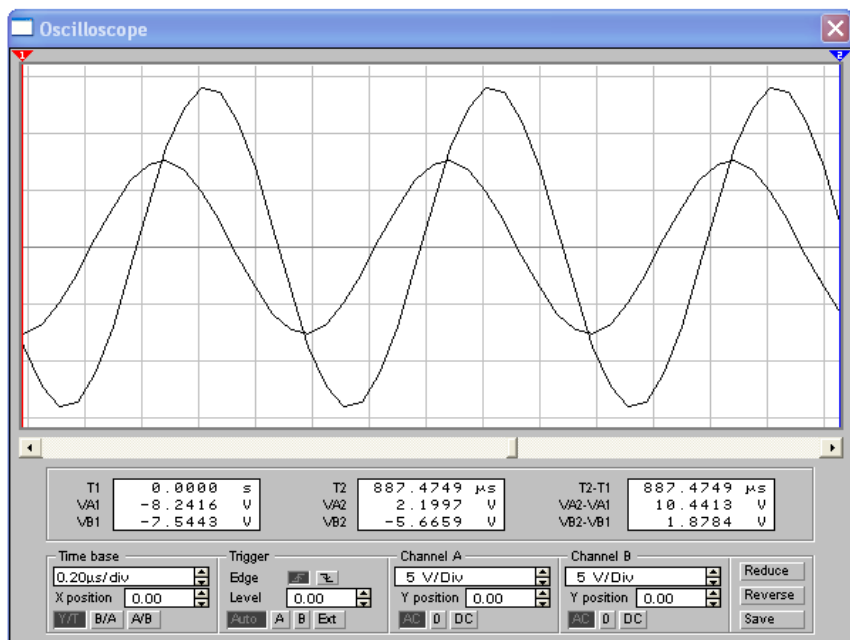
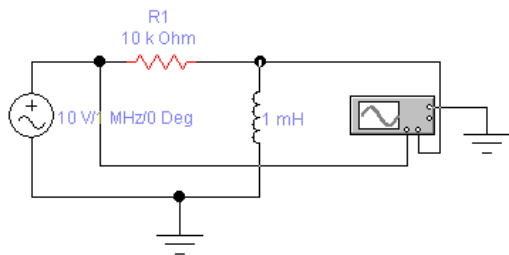


Рис. 2.12

## 2.8. Практическое занятие №8 «Моделирование простых электронных устройств»

2.8.1. В папке DATA пакета MicroCAP приведены модели различных электронных устройств, которые используются как примеры моделирования или заготовки для реализации других моделей.

2.8.2. Используйте модель IVBJT.CIR для демонстрации выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером. Смените тип транзистора, проанализируйте результаты.

2.8.3. Выберите модель генератора гармонических сигналов (файл COLPITTS.CIR), получите временные диаграммы его сигналов, определите частоту колебаний.

2.8.4. Запустите модель импульсного генератора на основе таймера 555 (файл 555ASTAB.cir). проведите моделирование в режиме «Переходные процессы». Изучите временные диаграммы, рассмотрите влияние емкости C1 на формируемые импульсные сигналы, объясните полученные результаты.

2.8.6. В программе WorkBench в папке CIRCUITS выберите файл 555-1.ewb и получите модель мультивибратора (импульсного генератора) показанную на рис. 2.13. Проведите ее исследование, рассмотрите временные диаграммы напряжений для различных параметров элементов цепи, сделайте выводы.

Выберите другой вариант модели, проанализируйте полученные результаты.

## 2.9. Практическое занятие №9 «Заключительное»

Занятие посвящено ликвидации задолженностей.

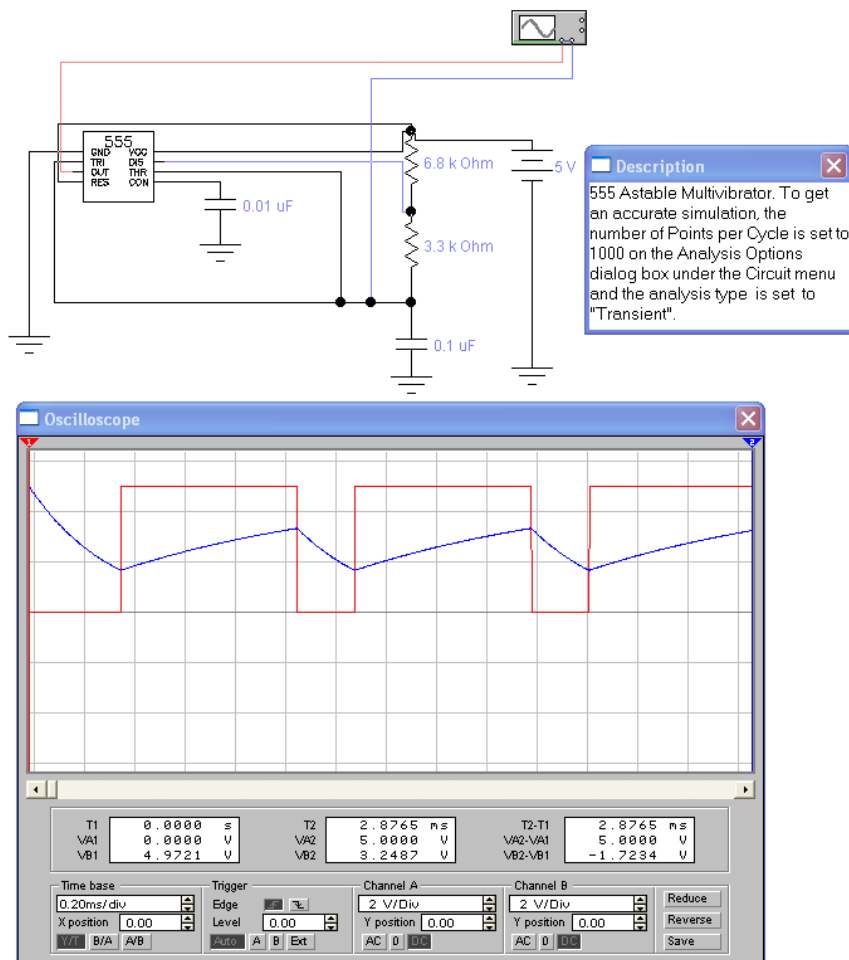


Рис. 2.13

### 3. ПРОГРАММА MATHCAD

#### 3.1. Назначение программы

Программа MathCAD предназначена для выполнения вычислений, записанных на экране монитора в привычном для человека виде (как на бумаге). Могут выполняться как простые вычисления выражений, функций, сумм, интегралов и т.д., так и сложные расчеты в соответствии с программой с использованием типовых операторов (if, for, while).

Английские символы программы вводятся с клавиатуры, а команды и операторы – через меню MathCAD («Арифметические инструменты», «Меню графиков» и др.) или с помощью «горячих» клавиш.

Результаты работы представляются в символьном (значения, таблицы, матрицы) или графическом (линии, поверхности) виде.

#### 3.2. Ввод данных

В MathCAD используются числовые или символьные данные (величины). Для числовых данных можно записать программу, пример которой показан на рис. 3.1а. Числа и знаки математических операций можно вводить с помощью «мыши» из меню «Арифметические инструменты» или через клавиатуру («\*» - умножение, «/» - деление и т.д.). Вывод результата обеспечивается командой (символом) « $\Rightarrow$ ».

$$\frac{5 \cdot 8}{10} = 4 \quad \text{а)}$$

$$a := 4 \quad bb := 12.455$$

$$c1 := \frac{2}{3} \quad cc22 := 2 \cdot 3 \quad \text{б)}$$

$$M := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix} \quad \text{в)}$$

Рис. 3.1

Символьной переменной (букве английского алфавита) необходимо присвоить числовое значение с помощью оператора присваивания ( $:=$ ) из того же меню или с помощью клавиатуры (Shift «;»), пример показан на рис. 3.1б.

Строчные и прописные символы одной буквы определяют **разные** переменные.

Можно определить **матричную** переменную, заполнив позиции для ввода чисел, как показано на рис. 3.1в.

Одномерный массив (матрица - столбец) может задаваться перечислением, как показано на рис. 3.2а. Первое число соответствует начальному элементу массива, второе (вводимое через запятую) - следующему элементу (их разность равна приращению), а третье (вводимое через символ точка с запятой) – последнему элементу массива чисел. Результат представлен ниже записи массива на рис. 3.2а и получен вводом символа « $\Rightarrow$ ».

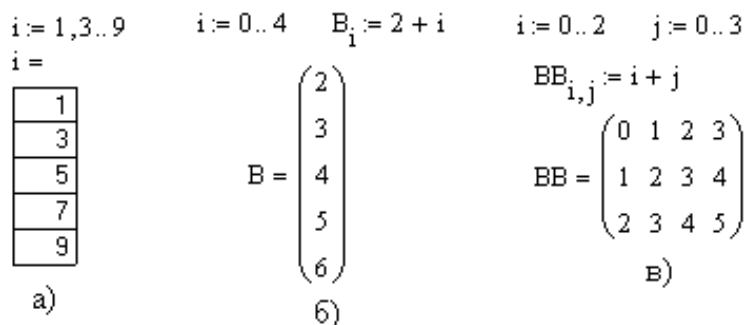


Рис. 3.2

С помощью одномерного массива задаются индексы элементов другого массива, как показано на рис.3.2б для одномерного и на рис. 3.в для двумерного массивов (как видно, это уже программы вычислений). Если в определении одномерного массива пропущен средний элемент, то шаг равен 1.

### 3.3. Операторы и функции

В программе MathCAD реализован широкий набор операторов (алгоритмов преобразования чисел) в меню «Арифметика», «Математика», «Матрицы». Это простые операторы (сложение, вычитание и т.д.), простые функции (тригонометрические, экспоненциальная, степенная функции и т.д.), суммы, произведения, производные и интегралы, матричные операции. Примеры применения операторов и функций показаны на рис. 3.3.

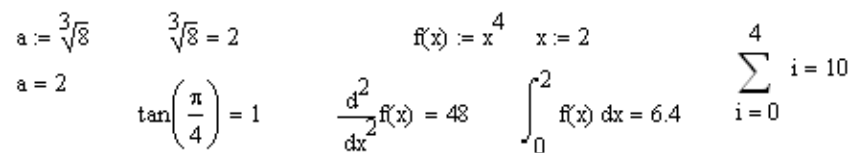


Рис. 3.3

Программа MathCAD позволяет использовать огромный набор элементарных и специальных функций с помощью меню «Вставить функцию».

### 3.4. Графики

Программа позволяет строить графики функций и одномерных массивов в декартовых или полярных координатах (примеры показаны на рис. 3.4.). Имеется возможность построения трехмерных графиков функций или массивов двух переменных в виде поверхности, контурного или точечного графика, трехмерной диаграммы или векторного поля (соответствующие примеры приведены на рис. 3.5).

Как видно, имеются разнообразные возможности представления графической информации, из которых необходимо выбирать тот, который соответствует решаемой задаче.

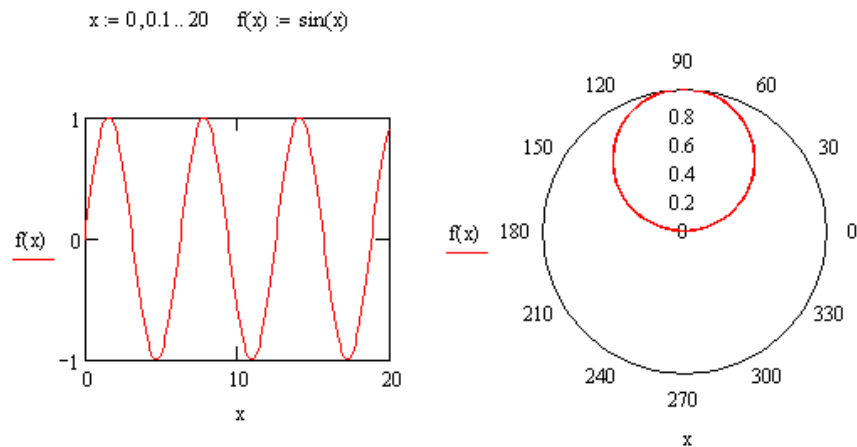


Рис. 3.4

Параметрическое описание функций двух переменных позволяет реализовать трехмерный массив данных, по которым можно построить трехмерную поверхность в различных видах, пример программы показан на рис. 3.5.

### 3.5. Программирование

В MathCAD предусмотрены развитые возможности программирования с помощью условного оператора if (если), операторов цикла for (для) и while (пока) и вспомогательных операторов программирования, например, add line (добавить строку программы) и ряд других. С их помощью можно реализовать разнообразные сложные вычислительные программы.

Пример применения оператора if показан на рис. 3.6. В этой программе формируется функция вида

$$g(x) = \begin{cases} x & \text{при } x < 0; \\ x^4 & \text{при } 0 \leq x < 3; \\ -(x-3)^4 + 81 & \text{при } x \geq 3. \end{cases} \quad (3.1)$$

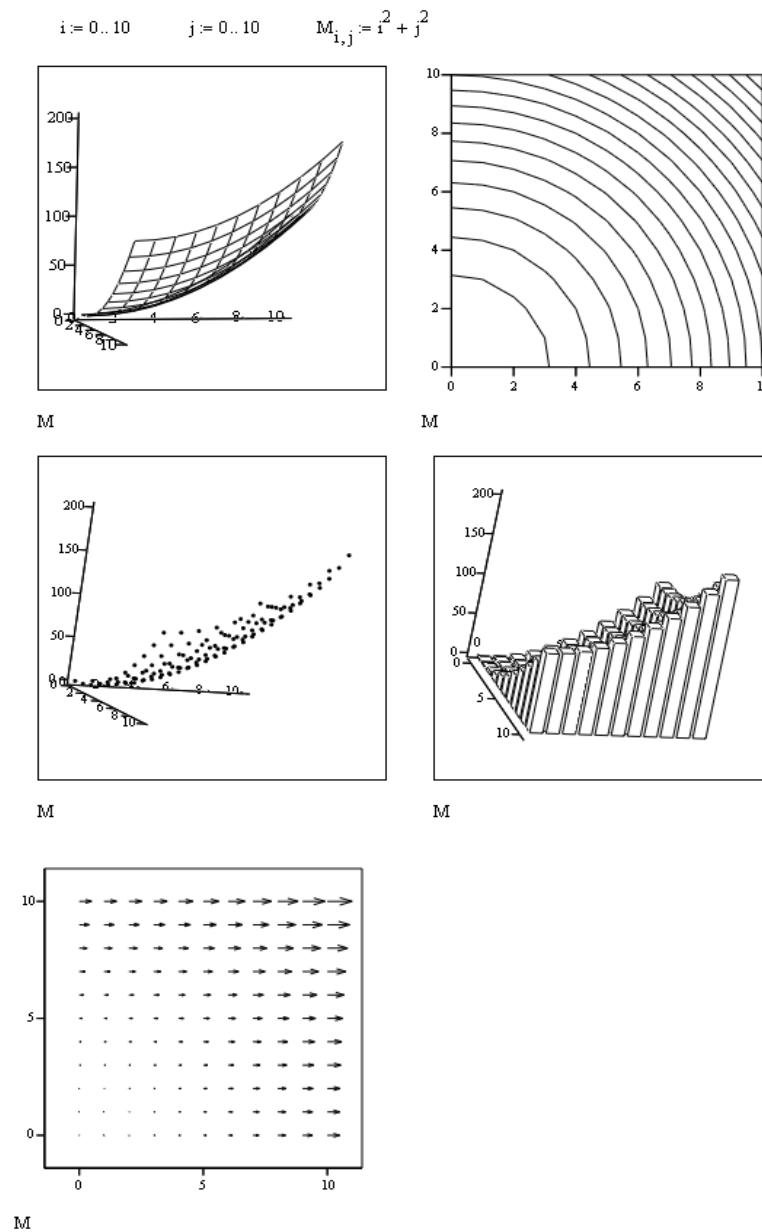


Рис. 3.5

График функции показан на рис. 3.6.

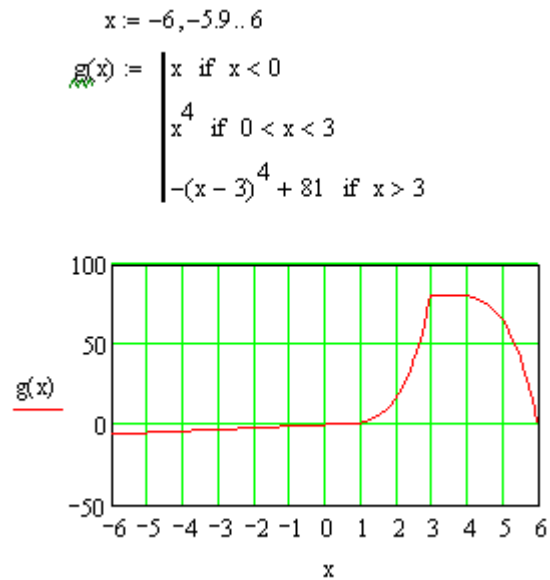


Рис. 3.6

На рис. 3.7 показан пример применения оператора цикла for для вычисления таблицы перемножения целых цифр 0,1,...,9, результат приведен в таблице на том же рисунке.

Пример применения оператора while приведен на рис. 3.8. В нем определяется максимум функции (3.1), показанной на рис. 3.6. В программе реализован простейший алгоритм перебора значений аргумента от минимального значения  $x = -6$  с шагом  $d = 0.001$  до тех пор, пока функция нарастает, то есть пока величина  $(g(x+d) - g(x))$  положительна. Результат равен 3.001, что близко к истинному значению переменной  $x = 3$ .

```
M := for m ∈ 0..9
      for n ∈ 0..9
        Mm,n ← m·n
      M
```

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
3	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27
4	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
6	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54
7	0	7	14	21	28	35	42	49	56	63
8	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
9	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81

Рис. 3.7

$$g(x) := \begin{cases} x & \text{if } x < 0 \\ x^4 & \text{if } 0 < x < 3 \\ -(x-3)^4 + 81 & \text{if } x > 3 \end{cases}$$

```
ym := x ← -6
      d ← 0.001
      y ← 0.01
      while y > 0
        x1 ← x + d
        y ← g(x1) - g(x)
        x ← x1
      x
```

ym = 3.001

Рис. 3.8




## 4. СИСТЕМА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MICROCAP




### 4.1. Формирование модели

Модель цепи формируется на экране в виде ее схемы, содержащей графические изображения элементов и соединительные линии (проводники). Элементы выбираются из меню Component, в котором содержатся простейшие аналоговые (Analog primitives) и цифровые (Digital primitives) компоненты, а также библиотеки моделей реальных электронных аналоговых (Analog library) и цифровых (Digital library) элементов.

Из библиотек манипулятором «мышь» выбираются (левой кнопкой мыши) и размещаются на экране (перемещаются при нажатой левой кнопке) изображения элементов цепи. В открывающемся окне задаются их параметры (Value). Параметры можно изменить в том же окне после установки маркера на изображении элемента и двойного щелчка левой кнопки мыши. Их размерность указывается с приставками, приведенными в таблице.

Английский символ	p	n	u	m	k	M
приставка	пико	нано	микро	милли	кило	мега

Повторным нажатием левой кнопки мыши устанавливается следующий такой же элемент. Эта последовательность прерывается щелчком правой кнопки или нажатием кнопки  в верхней левой части панели инструментов.

Элементы соединяются линиями (проводниками), режим изображения которых включается кнопками  или . Для проверки соединений в узловых точках нажмите кнопку , и на экране появятся точки узлов с их номерами.

После формирования схемы цепи **необходимо** задать точку нулевого потенциала с помощью символа «земля», который выбирается из меню Component / Analog primitives / Connectors / Ground.

### 4.2. Моделирование

С помощью меню Analysis программа осуществляет моделирование временных диаграмм сигналов (Transient Analysis), частотных характеристик (AC Analysis), постоянных токов и напряжений (DC Analysis).

В качестве примера рассмотрим модель цепи постоянного тока, показанную на рис. 4.1. В ней источник постоянного напряжения (Analog primitives\waveform sour\battery) с напряжением 10 В и два сопротивления  $R1 = R2 = 1\text{кОм}$ .

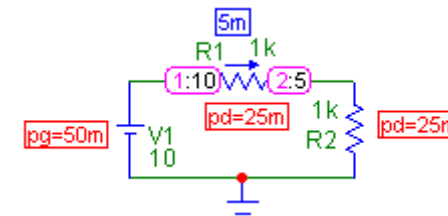


Рис. 4.1

В режиме «Анализ, расчет по постоянному току» проводится моделирование напряжений в узлах 1 (10 В) и 2 (5 В), тока в цепи (5 мА) и мощностей, потребляемых от источника (50 мВт) и в сопротивлениях (по 25 мВт). Эти результаты можно получить расчетом по закону Ома.

В режиме «Анализ, передаточные характеристики по постоянному току» можно получить зависимость напряжения в узле 2 (на сопротивлении R2) и тока в цепи  $i(R2)$  от напряжения источника V1. Окно установки параметров режима показано на рис. 4.2.

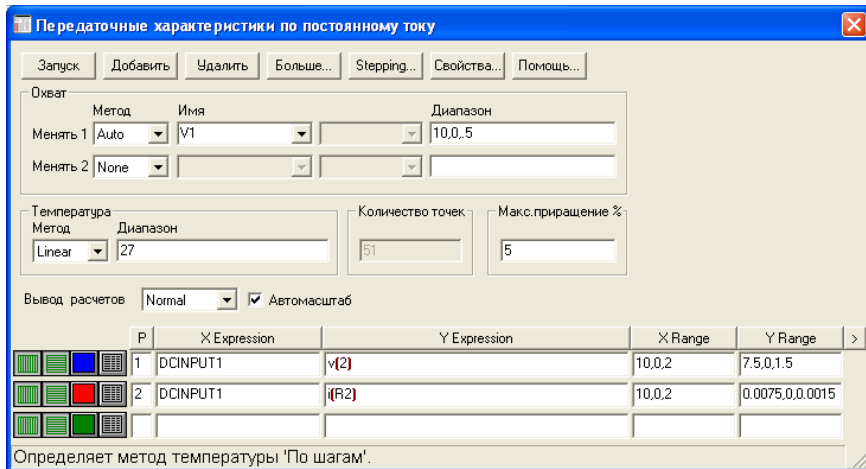


Рис. 4.2

На рис.4.3 показаны результаты моделирования передаточных характеристик по постоянному току.

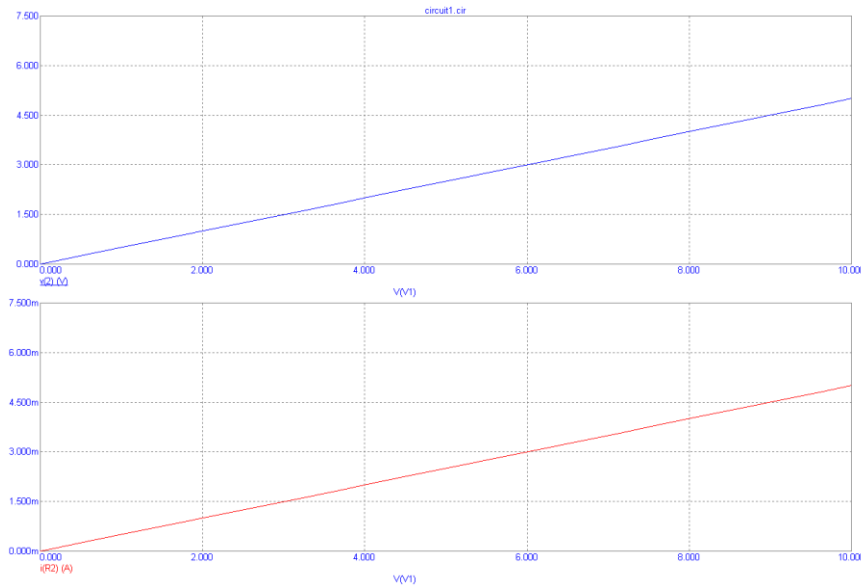


Рис. 4.3

Если в цепи на рис. 4.1 заменить источник постоянного напряжения на гармонический источник (Analog primitives\waveform sourс\Sine sourс, модель 1 MHz), то получим модель, показанную на рис. 4.4.

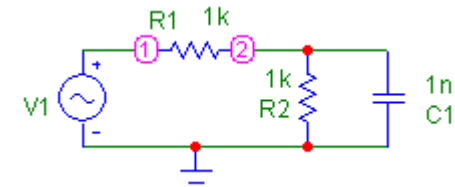


Рис. 4.4

Задание на моделирование в режиме «Анализ, переходные процессы» показано на рис. 4.5.

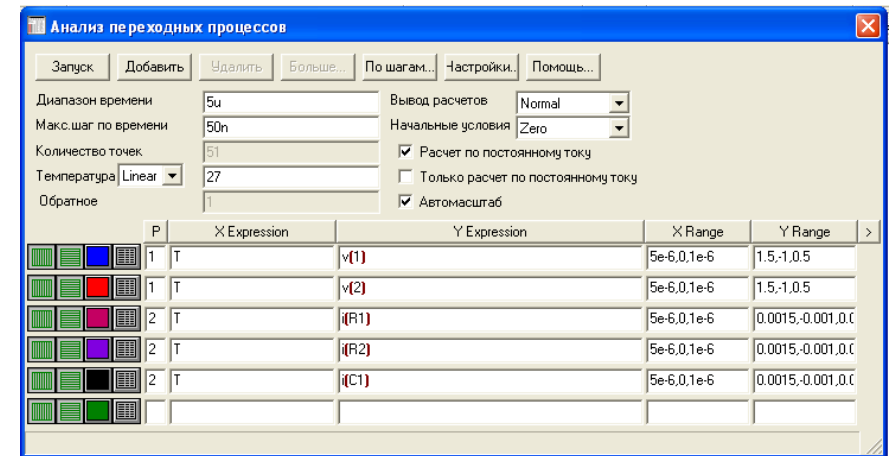


Рис. 4.5

Временные диаграммы гармонических напряжений в узлах 1 (на источнике) и 2 (на сопротивлении R2 и емкости C1) и токов в сопротивлениях R1 и R2 и емкости C1 приведены на рис. 4.6.

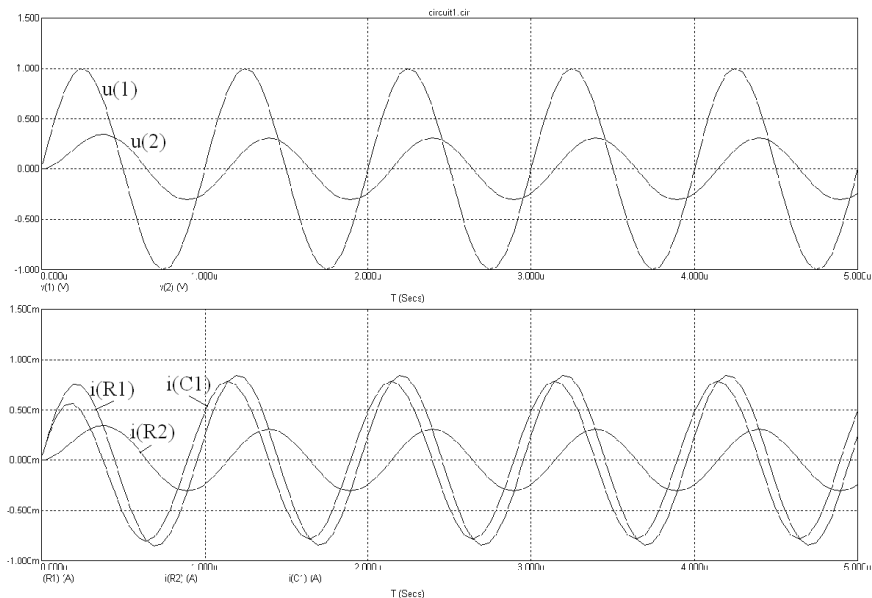


Рис. 4.6

Программы схемотехнического моделирования позволяют исследовать разнообразные и достаточно сложные аналоговые и цифровые электронные устройства.

## 5. ПРОГРАММА WORKBENCH

Программа Electronics Workbench предназначена для моделирования электрических схем. Ее возможности эквивалентны возможностям программы MicroCap и позволяют выполнять работы от простейших экспериментов до сложного моделирования.

При создании модели имеется возможность:

- выбирать элементы и приборы из библиотек,
- перемещать и поворачивать элементы и схемы,
- подключать несколько измерительных приборов и наблюдать их показания на экране монитора,
- изменять параметры элементов.

В отличие от MicroCap, перенос выбранного элемента из меню на поле схемы производится при удержании левой кнопки мыши.

Пример меню элементов модели показан на рис. 5.1.



Рис. 5.1

Примеры моделей показаны в разделах 1 и 2.

Особенностью программы Workbench является возможность использования моделей электронных приборов на рис. 5.2 (слева направо мультиметр, генератор сигналов, осциллограф, измеритель частотных характеристик и другие). Примеры применения этих моделей показаны на рис. 5.3.



Рис. 5.2.

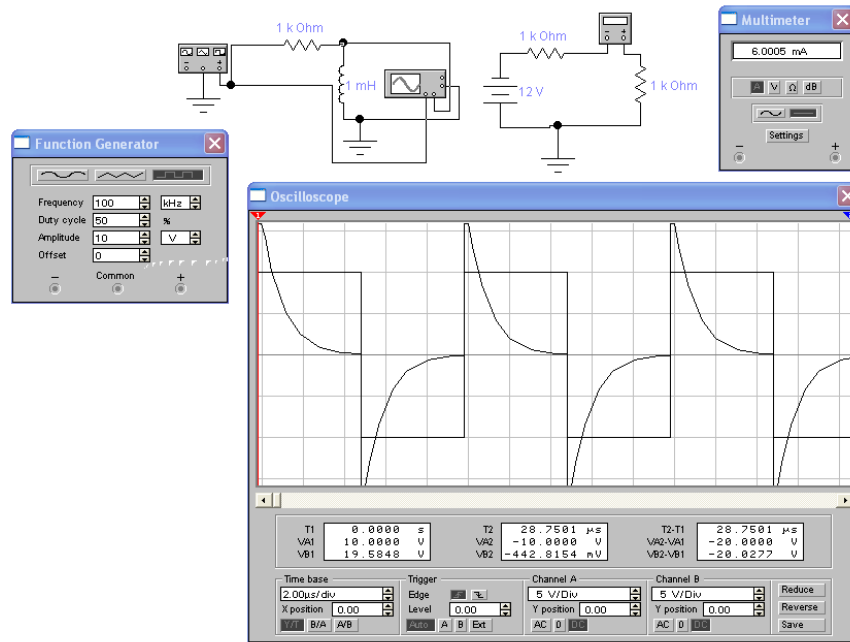


Рис. 5.3

## 6. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 6.1. Цепь постоянного тока

В цепи постоянного тока действуют постоянные напряжения, протекают постоянные токи и присутствуют только резистивные элементы (сопротивления).

Идеальным источником напряжения называют источник, напряжение  $U$  на зажимах которого, создаваемое внутренней электродвижущей силой (ЭДС  $E$ ), на зависит от формируемого им в нагрузке  $R_H$  тока  $I$  (рис. 6.1а). При этом имеет место равенство  $U = E$ . Вольтамперная характеристика идеального источника напряжения показана на рис. 6.1б.

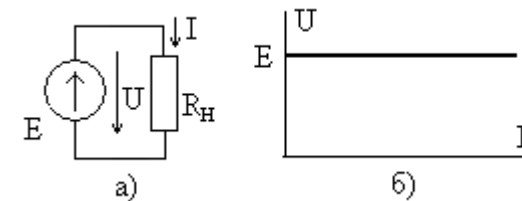


Рис. 6.1

Идеальным источником тока  $I_0$  называют источник, который отдает в нагрузку  $R_H$  ток, не зависящий от напряжения  $U$  на зажимах источника,  $I = I_0$  Рис. 6.2а. Его вольтамперная характеристика показана на рис. 6.2б.

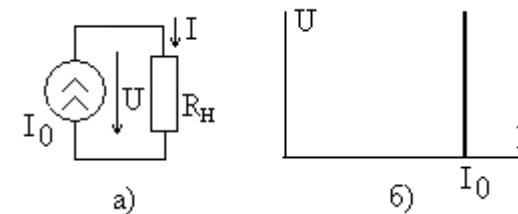


Рис. 6.2

В сопротивлении  $R$  связь между напряжением  $U$  и током  $I$  определяется законом Ома в виде

$$U = RI \quad \text{или} \quad I = U/R. \quad (6.1)$$

Пример электрической цепи показан на рис. 6.3. В ней выделяются **ветви**, состоящие из последовательного соединения нескольких элементов (источника  $E$  и сопротивления  $R_1$ ) или одного элемента ( $R_2$  и  $R_3$ ) и **узлы** – точки соединения трех и более ветвей, отмеченные жирными точками. В рассмотренном примере имеется  $p = 3$  ветви и  $q = 2$  узла.

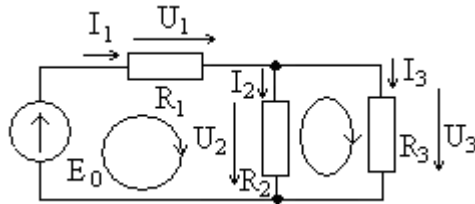


Рис. 6.3

Кроме того, в цепи выделяются **независимые замкнутые контуры**, не содержащие идеальные источники тока. Их число равно  $n = p - q + 1$ . В примере на рис. 6.3 их число  $n = 2$ , например, контуры с ветвями  $E R_1 R_2$  и  $R_1 R_2$ , показанные на рис. 6.3 овалами со стрелками, указывающими **положительное направление** обхода контура.

Связь токов и напряжений в цепи определяется законами Кирхгофа.

**Первый закон Кирхгофа:** алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю,

$$\sum_k I_k = 0. \quad (6.2)$$

Втекающие в узел токи имеют знак плюс, а вытекающие минус.

**Второй закон Кирхгофа:** алгебраическая сумма напряжений на элементах замкнутого независимого контура равна алгебраической сумме ЭДС идеальных источников напряжения, включенных в этом контуре,

$$\sum_k U_k = \sum_n U_n. \quad (6.3)$$

Напряжения и ЭДС берутся со знаком плюс, если их положительные направления совпадают с направлением обхода контура, в противном случае используется знак минус.

Для приведенного на рис. 6.3 примера по закону Ома получим подсистему компонентных уравнений

$$\begin{cases} U_1 = R_1 I_1, \\ U_2 = R_2 I_2, \\ U_3 = R_3 I_3. \end{cases} \quad (6.4)$$

По законам Кирхгофа подсистема топологических уравнений цепи имеет вид

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0, \\ U_1 + U_2 = E_0, \\ U_2 - U_1 = 0. \end{cases} \quad (6.5)$$

## 6.2. Расчет на основе закона Ома

Этот метод удобен для расчета сравнительно простых цепей с одним источником сигнала. Он предполагает вычисление сопротивлений участков цепи, для которых известна вели-

чина тока (или напряжения), с последующим определением неизвестного напряжения (или тока). Рассмотрим пример расчета цепи, схема которой приведена на рис. 6.4, при токе идеального источника  $I_0 = 1\text{А}$  и сопротивлениях  $R_1 = 5\text{Ом}$ ,  $R_2 = 10\text{Ом}$ ,  $R_3 = 20\text{Ом}$ . Необходимо определить токи ветвей  $I_1$  и  $I_2$ , а также напряжения на сопротивлениях  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$ .

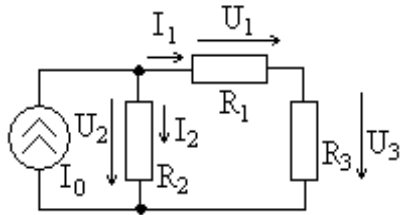


Рис. 6.4

Известен ток источника  $I_0$ , тогда можно вычислить сопротивление цепи  $R_{\text{общ}}$  относительно зажимов источника тока (параллельного соединения сопротивления  $R_2$  и последовательно соединенных сопротивлений  $R_1$  и  $R_3$ ),

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{10(5 + 20)}{5 + 10 + 20} = 7,14\text{Ом}.$$

Напряжение  $U_2$  на источнике тока (на сопротивлении  $R_2$ ) равно

$$U_2 = R_{\text{общ}} I_0 = 7,143 \cdot 1 = 7,14\text{ В}.$$

Затем можно найти токи ветвей

$$I_1 = \frac{U_2}{R_1 + R_3} = \frac{7,143}{5 + 20} = 0,286\text{ А},$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{7,143}{10} = 0,714\text{ А}.$$

Полученные результаты можно проверить с помощью первого закона Кирхгофа в виде  $I_1 + I_2 = I_0$ . Подставляя вычисленные значения, получим  $I_1 + I_2 = 0,286 + 0,714 = 1\text{ А}$ , что совпадает с величиной тока источника.

Зная токи ветвей, нетрудно найти напряжения на сопротивлениях (величина  $U_2$  уже найдена)

$$U_1 = R_1 I_1 = 5 \cdot 0,286 = 1,43\text{ В},$$

$$U_3 = R_3 I_1 = 20 \cdot 0,286 = 5,72\text{ В}.$$

По второму закону Кирхгофа  $U_2 = U_1 + U_3$ . Складывая полученные результаты, убеждаемся в его выполнении.

### 6.3. Расчет цепи по уравнениям Кирхгофа

Проведем расчет токов и напряжений в цепи, показанной на рис. 6.3 при  $E_0 = 10\text{ В}$  и  $R_1 = R_2 = R_3 = 1\text{ кОм}$ . Цепь описывается системой уравнений (6.4) и (6.5), из которой для токов ветвей получим

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0, \\ R_1 I_1 + R_2 I_2 = E_0, \\ R_2 I_2 - R_3 I_3 = 0. \end{cases} \quad (6.6)$$

Из первого уравнения выразим  $I_1 = I_2 + I_3$ , а из третьего

$$I_3 = \frac{R_2}{R_3} I_2.$$

Тогда из второго уравнения получим

$$I_2 = \frac{E_0 R_3}{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3},$$

и, следовательно

$$I_3 = \frac{E_0 R_2}{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3},$$

$$I_1 = \frac{E_0(R_2 + R_3)}{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3}.$$

Из уравнений закона Ома запишем

$$U_1 = \frac{E_0(R_2 + R_3)R_1}{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3}.$$

$$U_2 = U_3 = \frac{E_0 R_3 R_2}{R_1(R_2 + R_3) + R_2 R_3}.$$

Нетрудно убедиться, что выполняется второй закон Кирхгофа

$$U_1 + U_2 = E_0.$$

Подставляя численные значения, получим

$$I_1 = 6,67 \text{ мА}, \quad I_2 = I_3 = 3,33 \text{ мА},$$

$$U_1 = 6,67 \text{ В}, \quad U_2 = U_3 = 3,33 \text{ В}.$$

Эти же результаты можно получить, используя только закон Ома.

#### 6.4. Мощность в цепи постоянного тока

Действующие в цепи **идеальные источники** тока и (или) напряжения отдают мощность в подключенную к ним цепь (нагрузку). Для цепи на рис. 6.1а отдаваемая идеальным источником напряжения мощность  $P_E$  равна

$$P_E = U \cdot I = E \cdot I, \quad (6.7)$$

а в цепи на рис. 6.2а идеальный источник тока отдает в нагрузку мощность

$$P_I = U \cdot I = U \cdot I_0. \quad (6.8)$$

Подключенная к источнику внешняя резистивная цепь потребляет от него мощность, преобразуя ее в другие виды энергии, чаще всего в тепло.

Если через сопротивление  $R$  протекает ток  $I$ , а приложенное к нему напряжение равно  $U$ , то для потребляемой сопротивлением мощности  $P$  получим

$$P = U \cdot I. \quad (6.9)$$

С учетом уравнений закона Ома (6.1) можно записать

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}. \quad (6.10)$$

Если в цепи несколько сопротивлений, то сумма потребляемых ими мощностей равна суммарной мощности, отдаваемой в цепь всеми действующими в ней источниками. Это **условие баланса мощностей**.

Например, для цепи на рис. 6.3 в общем виде получим

$$I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 = E_e I_1. \quad (6.11)$$

Подставляя в левую часть равенства (6.11) полученные ранее выражения для токов, получим

$$\begin{aligned} & \frac{E_0^2 (R_2 + R_3)^2 R_1}{[R_1 (R_2 + R_3) + R_2 R_3]^2} + \frac{E_0^2 R_3^2 R_2}{[R_1 (R_2 + R_3) + R_2 R_3]^2} + \frac{E_0^2 R_2^2 R_3}{[R_1 (R_2 + R_3) + R_2 R_3]^2} = \\ & = E_0^2 \frac{(R_2 + R_3)^2 R_1 + R_3^2 R_2 + R_2^2 R_3}{[R_1 (R_2 + R_3) + R_2 R_3]^2} = E_0^2 \frac{(R_2 + R_3) [(R_2 + R_3) R_1 + R_3 R_2]}{[R_1 (R_2 + R_3) + R_2 R_3]^2} = \\ & = E_0 \frac{E_0 (R_2 + R_3)}{[R_1 (R_2 + R_3) + R_2 R_3]} = E_e I_1, \end{aligned}$$

что соответствует правой части выражения (6.11).

Аналогичные расчеты можно проделать и для цепи на рис. 6.4.

Условие баланса мощностей позволяет дополнительно контролировать правильность расчетов.

## 7. ЦЕПИ С ГАРМОНИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ

### 7.1. Гармонический сигнал

Гармонический сигнал  $s(t)$  записывают в виде

$$s(t) = S_m \cos(\omega t + \psi), \quad (7.1)$$

где  $S_m$  - амплитуда сигнала (индекс  $m$  от слова «максимум»),  $\omega$  - круговая частота, а  $\psi$  - начальная фаза. Временная диаграмма гармонического сигнала  $s(t)$  показана на рис. 7.1.

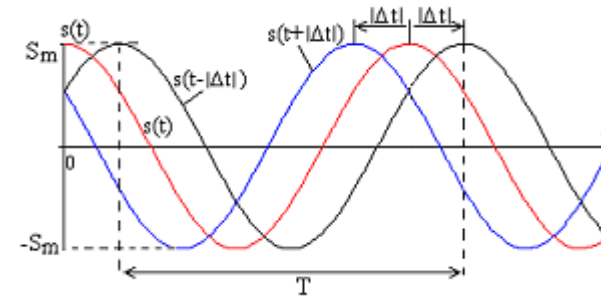


Рис. 7.1

**Амплитуда** гармонического сигнала – это его максимальное значение, она измеряется в единицах сигнала (вольтах для напряжения и амперах для тока).

**Период** сигнала  $T$  (рис. 7.1) определяет **циклическую частоту**  $f$  его повторения,

$$f = \frac{1}{T}, \quad (7.2)$$

измеряемую в герцах (Гц). Ее физический смысл – число периодов колебаний в секунду.



Аргумент косинуса в (7.1) вида

$$\xi(t) = \omega t + \psi \quad (7.3)$$

называют **полной фазой** колебания, она пропорциональна текущему времени и измеряется в радианах или градусах.

**Круговая частота**  $\omega$  равна

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (7.4)$$

и представляет собой число радиан, на которое изменяется полная фаза колебания в единицу времени (1 с).

При  $t = 0$  полная фаза равна  $\xi(0) = \psi$ , поэтому параметр  $\psi$  называют **начальной фазой** гармонического сигнала. Она измеряется в радианах или градусах. Так как период функции  $\cos(\xi)$  равен  $2\pi$  или  $360^\circ$ , то начальная фаза оказывается многозначной величиной. Например, значения начальной фазы  $30^\circ$  и  $(30^\circ + 360^\circ) = 390^\circ$ , а также  $(30^\circ - 360^\circ) = -330^\circ$  оказываются эквивалентными. Для устранения неоднозначности договариваются, что значения начальной фазы должны находиться, например, в интервале от 0 до  $2\pi$ , или от  $-\pi$  до  $\pi$  (аналогичные границы могут быть заданы в градусах).

Начальная фаза связана со смещением гармонического сигнала во времени на величину  $\Delta t$  относительно функции  $s(t) = S_m \cos(\omega t)$ , как показано на рис. 7.1. Функция  $s(t + |\Delta t|)$  смещена влево относительно  $s(t)$ , а  $s(t - |\Delta t|)$  - вправо. Положительные значения  $\Delta t$  отсчитываются в сторону увеличения  $t$ , а отрицательные – наоборот. Из (7.1) можно записать

$$s(t) = S_m \cos(\omega t + \psi) = S_m \cos\left[\omega\left(t + \frac{\psi}{\omega}\right)\right] = S_m \cos[\omega(t - \Delta t)], \quad (7.5)$$

где смещение во времени  $\Delta t$  равно

$$\Delta t = -\frac{\psi}{\omega}. \quad (7.6)$$

Тогда для начальной фазы получим

$$\psi = -\omega \cdot \Delta t. \quad (7.7)$$

Как видно, начальная фаза определяется временным сдвигом  $\Delta t$  гармонического сигнала относительно функции  $s(t) = S_m \cos(\omega t)$ . При  $\Delta t > 0$  сигнал  $s(t + \Delta t)$  смещается вправо (позднее сигнала  $s(t)$ ) по оси времени, при этом его начальная фаза  $\psi < 0$ , а если  $\Delta t < 0$ , то временная диаграмма смещается влево (раньше  $s(t)$ ) по оси времени, а  $\psi > 0$ .

Величина начальной фазы зависит от начала отсчета времени (положения точки  $t = 0$ ). При смещении начала отсчета времени изменяется и начальная фаза.

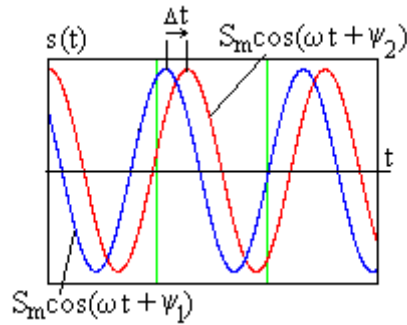
Применительно к двум гармоническим сигналам  $s_1(t) = S_m \cos(\omega t + \psi_1)$  и  $s_2(t) = S_m \cos(\omega t + \psi_2)$  с разными начальными фазами  $\psi_1$  и  $\psi_2$  вводится в рассмотрение **сдвиг фаз между первым и вторым сигналами**,

$$\varphi = \psi_1 - \psi_2. \quad (7.8)$$

На рис. 7.2 показаны два гармонических сигнала с начальными фазами  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , причем  $\psi_1 > \psi_2$  и  $\varphi = \psi_1 - \psi_2 > 0$ . В этом случае говорят, что первый сигнал **опережает по фазе** второй или второй сигнал **отстает по фазе** от первого.

Сдвиг фаз  $\varphi = \psi_1 - \psi_2$  связан со смещением  $\Delta t$  сигналов во времени

$$\varphi = -\omega \Delta t, \quad (7.9)$$



фаза

Рис. 7.2

образованная показана в табл. 7.1.

положительные значения временного сдвига отсчитываются в направлении оси времени. Гармоническое колебание может быть задано в нетипичной форме, которую необходимо преобразовать к виду (7.1), иначе начальная

оказывается неопределенной. Примеры пре-

Таблица 7.1.

Исходный сигнал	Преобразованный сигнал	Начальная фаза
$S_m \sin(\psi t + \psi)$	$S_m \cos(\psi t + \psi - \pi/2)$	$\psi - \pi/2$
$-S_m \sin(\psi t + \psi)$	$S_m \cos(\psi t + \psi + \pi/2)$	$\psi + \pi/2$
$-S_m \cos(\psi t + \psi)$	$S_m \cos(\psi t + \psi \pm \pi)$	$\psi \pm \pi$

### 7.2. Схемотехническое моделирование

Рассмотрим цепь, показанную на рис. 7.3 при  $e(t) = E \sin(\omega t)$ ,  $E = 1$  В,  $R_e = 1$  кОм,  $f = 50$  кГц,  $\omega = 2\pi f = 324,6$  рад/с.

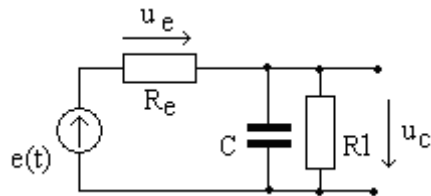


Рис. 7.3

Построим модель цепи в программе MicroCAP, показанную на рис. 7.4.

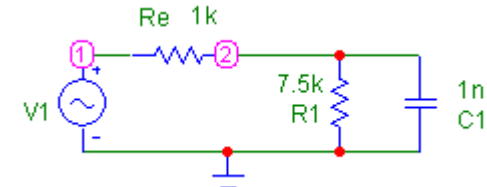


Рис. 7.4

На рис. 7.5 показаны временные диаграммы напряжений источника  $e(t)$  (кривая с самой большой амплитудой), напряжения  $u_c$  в узле 2 (на емкости  $C$  и сопротивлении  $R2$ ) и напряжения  $u_{R1}$  на сопротивлении  $R1$ .

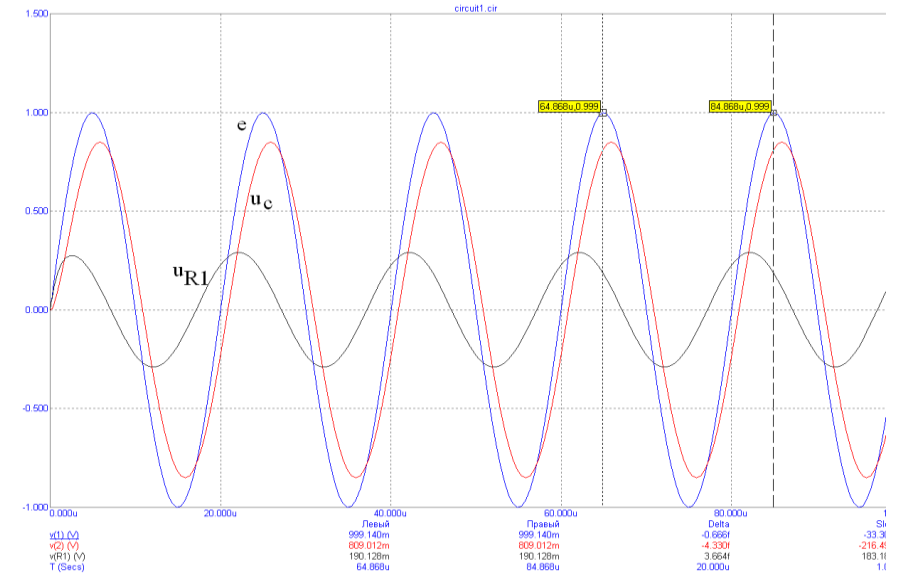


Рис. 7.5

По кривым на рис. 7.5 определяются амплитуды напряжений и их сдвиги во времени относительно напряжения источника, значения которых приведены в табл. 7.2.

Начальные фазы связаны со сдвигом во времени соотношением

$$\psi = -2\pi F \cdot \Delta t,$$

результаты расчетов приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Элемент	U, В	$\Delta t_u$ мкс	$\psi_u$ рад
V1	1	0	0
$R_e$	0,29	1	0,785
$R_1, C_1$	0,85	-2,5	-0,314

Уравнение второго закона Кирхгофа имеет вид

$$u_e(t) + u_c(t) - e(t) = 0.$$

Обозначим левую часть уравнения

$$x(t) = u_e(t) + u_c(t) - e(t).$$

При точных расчетах выполняется условие  $x(t) = 0$ , а при приближенных (округленных) результатах моделирования появляется погрешность  $x(t)$ , которую можно представить графически. Программа расчета в программе MathCAD показана на рис. 7.6, а результаты - на рис. 7.7.

Аналогичные результаты необходимо получить для токов в элементах цепи и проверить выполнение первого закона Кирхгофа. Требуется исследовать фазовые соотношения меж-

ду токами и напряжениями в элементах цепи.

$$\begin{aligned}
 F &:= 50000 & t &:= 0,10^{-8} .. 5 \cdot 10^{-5} & E &:= 1 & U_e &:= 0.29 & U_c &:= 0.85 \\
 dtc &:= 1 \cdot 10^{-6} & dte &:= -2.5 \cdot 10^{-6} & \psi_e &:= -2 \cdot \pi \cdot F \cdot dte & \psi_e &= 0.785 \\
 \psi_c &:= -2 \cdot \pi \cdot F \cdot dtc & \psi_c &= -0.314 \\
 e(t) &:= 1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t) & u_e(t) &:= U_e \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t + \psi_e) \\
 u_c(t) &:= U_c \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t + \psi_c) & x(t) &:= u_e(t) + u_c(t) - e(t)
 \end{aligned}$$

Рис. 7.6

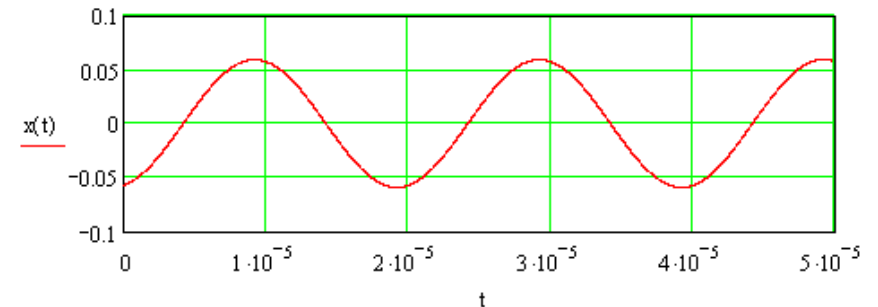
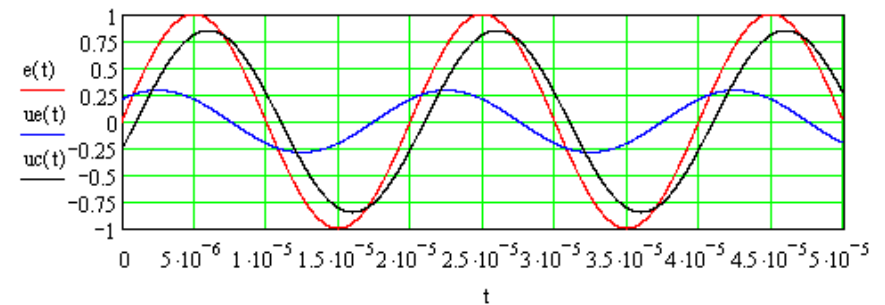


Рис. 7.7

Как видно, временные диаграммы напряжений в верхней части рис.7.7 совпадают с результатами моделирования. Из графика  $x(t)$  в нижней части рис. 7.7 следует, что погреш-

ность выполнения второго закона Кирхгофа меняется по гармоническому закону с амплитудой 0,06 В (6 % от амплитуды напряжения источника), что обусловлено погрешностями измерения амплитуд и начальных фаз напряжений по результатам моделирования.

моническому закону с амплитудой 0,06 В (6 % от амплитуды напряжения источника), что обусловлено погрешностями измерения амплитуд и начальных фаз напряжений по результатам моделирования.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица двоичных кодов номера студента

N	N <sub>2</sub>	N	N <sub>2</sub>	N	N <sub>2</sub>	N	N <sub>2</sub>
1	00001	11	01011	21	10101	31	11111
2	00010	12	01100	22	10110	32	00001
3	00011	13	01101	23	10111	33	00010
4	00100	14	01110	24	11000	34	00011
5	00101	15	01111	25	11001	35	00100
6	00110	16	10000	26	11010	36	00101
7	00111	17	10001	27	11011	37	00110
8	01000	18	10010	28	11100	38	00111
9	01001	19	10011	29	11101	39	01000
10	01010	20	10100	30	11110	40	01001

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные вычислительные и моделирующие программы позволяют эффективно выполнять радиотехнические расчеты и схемотехническое моделирование электрических цепей. Их освоение является важнейшим элементом подготовки специалистов в области радиотехники.

1. Литвиненко В.П. Расчет линейных электрических цепей: учеб. пособие / В.П. Литвиненко, Ю.В. Литвиненко. Воронеж: ВГТУ, 2009. 243 с.

2. Литвиненко В.П. Основы электротехники. Ч. 1. Цепи постоянного тока, линейные цепи при гармонических воздействиях: учеб. пособие / В.П. Литвиненко. Воронеж: ВГТУ, 2007. 152 с.

3. Макаров Е. Г. – Mathcad: учебный курс. / Е.Г. Макаров. СПб, Питер, 2009.

4. Амелина М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. / С.А. Амелин. М, «Горячая линия – Телеком», 2007.

5. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC : Программа Electronics Workbench и ее применение. / В.И. Карлащук. М. : СОЛОН, 2003.

102  
СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	1
1. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ .....	4
1.1. Лабораторная работа №1. «Ознакомительная» .....	4
1.2. Лабораторная работа №2. «Вычисление выражений и массивов» .....	7
1.3. Лабораторная работа №3. «Функции и графики» .....	12
1.4. Лабораторная работа №4. «Уравнения и системы» .....	15
1.5. Лабораторная работа №5. «Расчет цепи постоянного тока» .....	16
1.6. Лабораторная работа №6. «Модели источников сигнала» .....	20
1.7. Лабораторная работа №7. «Моделирование цепи постоянного тока» .....	28
1.8. Лабораторная работа №8. «Моделирование цепей с переменными сигналами» .....	33
1.9. Лабораторная работа №9. «Моделирование простых электронных устройств» .....	40
1.10. Дополнительные задания .....	47
2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ .....	49
2.1. Практическое занятие №1. «Вводное, язык MathCAD» .....	49
2.2. Практическое занятие №2. «Программирование в MathCAD» .....	52
2.3. Практическое занятие №3. «Представление результатов в MathCAD» .....	54
2.4. Практическое занятие №4. «Системы WorkBench и MicroCAP» .....	57
2.5. Практическое занятие №5. «Модели элементов в WorkBench и MicroCAP» .....	61

2.6. Практическое занятие №6. «Моделирование цепей постоянного тока в WorkBench и MicroCAP» .....	65
2.7. Практическое занятие №7. «Моделирование цепей гармонического тока в WorkBench и MicroCAP» .....	67
2.8. Практическое занятие №8. «Моделирование простых электронных устройств» .....	69
2.9. Практическое занятие №9. «Заключительное» .....	70
3. ПРОГРАММА MATHCAD .....	72
3.1. Назначение программы .....	72
3.2. Ввод данных .....	72
3.3. Операторы и функции .....	74
3.4. Графики .....	74
3.5. Программирование .....	75
4. СИСТЕМА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MICROCAP .....	79
4.1. Формирование модели .....	79
4.2. Моделирование .....	80
5. ПРОГРАММА WORKBENCH .....	84
6. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	86
6.1. Цепь постоянного тока .....	86
6.2. Расчет на основе закона Ома .....	88
6.3. Расчет цепи по уравнениям Кирхгофа .....	90
6.4. Мощность в цепи постоянного тока .....	92
7. ЦЕПИ С ГАРМОНИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ ...	94
7.1. Гармонический сигнал .....	94
7.2. Схемотехническое моделирование .....	97
Заключение .....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	101
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	102

Учебное издание

Литвиненко Владимир Петрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫЧИСЛЕНИЯ:  
ПРАКТИКУМ

В авторской редакции  
Компьютерный набор В.П. Литвиненко

Подписано в печать 5.02.2013.  
Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов.  
Усл. печ. л. 6,6. Уч.-изд. л. 5,7. Тираж 250 экз.  
Зак. №

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14