

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра «Микропроцессорная техника  
и информационно-управляющие системы»**

**А.А. КОРОЛЕВ, В.В. ШЕВЦОВ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ  
для студентов электротехнического факультета**

**Гомель 2016**

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1 .....	3
Лабораторная работа № 2 .....	4
Лабораторная работа № 3 .....	6
Лабораторная работа № 4 .....	7
Лабораторная работа № 5 .....	8
Лабораторная работа № 6 .....	9
Лабораторная работа № 7 .....	10
Лабораторная работа № 8 .....	11
Лабораторная работа № 9 .....	11
Лабораторная работа № 10 .....	14
Лабораторная работа № 11 .....	16
Лабораторная работа № 12 .....	22
Лабораторная работа № 13 .....	23
Лабораторная работа № 14 .....	24
Лабораторная работа № 15 .....	25
Лабораторная работа № 16 .....	26
Лабораторная работа № 17 .....	28
Лабораторная работа № 18 .....	29
Лабораторная работа № 19 .....	30
Лабораторная работа № 20 .....	31
Лабораторная работа № 21 .....	32
Лабораторная работа № 22 .....	33

# Лабораторная работа № 1

## Освоение системы автоматизации математических расчётов (системы компьютерной математики) Maple. Моделирование и анализ типовых входных воздействий технических систем

**Цель работы:** Освоение системы компьютерной математики Maple. Освоение вычислений и процесса их автоматизации в СКМ Maple. Получение навыков моделирования типовых входных сигналов технических систем (ТС), выполнения интегральных преобразований, автоматизации моделирования и анализа статического состояния ТС.

**Задание к лабораторной работе:**

1 Загрузить пакет Maple.

2 Вызвать функции `sqrt(3)`; `sqrt(3.)`; `sqrt(3):` `3*sin(1)`; `3*sin(1.)`;

Сравнить результаты вычислений.

Вызвать функции `evalf(sqrt(3))`; `evalf(sin(1))`; получить и сравнить результаты.

3 Для функции `sqrt(3)` выполнить перевод входного и выходного форматов из текстовой нотации в математическую и наоборот. Перевести строку вызова функции в формат текстового комментария и наоборот.

4 Решить:

– аналитически алгебраическое уравнение  $A \cdot x^2 + B \cdot x + C = D$  относительно переменных  $x$  и  $B$ ;

– аналитически уравнение относительно переменной  $x$ :

$$x + \frac{1}{x} = 2 \frac{m^2 + n^2}{m^2 - n^2} .$$

При выполнении п.4 использовать функцию системы `solve`.

5 Разложить функцию в заданной точке в степенной ряд (использовать функцию `series`). Индивидуальное задание взять из таблицы № 1 в соответствии с вариантом задания.

6 Преобразовать выражение `sinh(x) + cos(x)` в экспоненциальную форму (использовать функцию `convert`).

7 Преобразовать и упростить выражение

$$F := \cos^5(x) + \sin^4(x) + 2 \cdot \cos^2(x) - 2 \cdot \sin^2(x) - \cos(2 \cdot x)$$

с помощью функции `simplify`.

8 Выполнить эквивалентные преобразования (использовать функцию `expand`):

$$\sin(x + y);$$

$$(a + d)^3;$$

$$(a + b + c)^2.$$

9 Разложить выражения на множители (использовать функцию `factor`):

$$x^3 + 4x^2 + 5x + 2;$$

$$3x^6 + 12x^4 + 96x^2;$$

$$x^5 + 5x^3 - 6x^2.$$

10 Вычислить производную функции (использовать функцию `diff`). Индивидуальное задание взять из

таблицы № 2 в соответствии с вариантом задания.

**11** Вычислить неопределенный и определенный интеграл функции (использовать функцию **int**). При вычислении определённого интеграла получить численное значение. Индивидуальное задание взять из таблицы № 3 в соответствии с вариантом задания.

**12** Подключить пакет функционального расширения **inttrans** (т.е. дополнительную специализированную библиотеку) **>with (inttrans)**; (см. пример) и выполнить следующие интегральные преобразования:

– прямое (**laplace**) и обратное (**invlaplace**) преобразование Лапласа;

– прямое (**fourier**) и обратное (**invfourier**) преобразование Фурье.

Убедиться в эквивалентности преобразований.

Индивидуальное задание взять из таблицы № 1 в соответствии с вариантом задания.

**13** Решить аналитически ОДУ (использовать функцию **dsolve**). Индивидуальное задание взять из таблицы № 4 в соответствии с вариантом задания.

**14** Построение графиков типовых функций в СКМ **Maple**.

**14.1** Построить график функции согласно индивидуальному заданию из таблицы 5. Для построения графика использовать функцию **plot**.

**14.2** Построить графики следующих типовых функций:

– единичной;

– Хевисайда;

– Дирака.

**14.3** Для всех функций п.14 выполнить преобразования Лапласа и Фурье.

**15** Задать, сложить (**S := matadd (A, B)**) и перемножить (**C := multiply (A, B)**) две матрицы **A** и **B** в символьном виде размерностью **3 x 3**. Задать массив в виде вектора.

**16** Решить систему из трёх алгебраических уравнений матричным способом в общем виде относительно заданных неизвестных **X1, X2, X3** (использовать функцию **linsolve**):

$$A_{11} \cdot X_1 + A_{12} \cdot X_2 + A_{13} \cdot X_3 = B_1;$$

$$A_{21} \cdot X_1 + A_{22} \cdot X_2 + A_{23} \cdot X_3 = B_2;$$

$$A_{31} \cdot X_1 + A_{32} \cdot X_2 + A_{33} \cdot X_3 = B_3.$$

**17** Сформулировать выводы по работе.

**18** Сохранить результаты работы.

**19** Подготовить и отчет по работе. В отчет включить только индивидуальное задание.

## Лабораторная работа № 2

### *Моделирование и анализ статических состояний схем*

**Цель работы:** *Освоение методики моделирования и анализа статических состояний технических систем. Освоение принципов разработки электронных документов автоматизации инженерных расчётов.*

**1** Освоить следующие операции раздела *Insert*:

**1.1** Выполнить вставку и удаление секции, подсекции, параграфа и вычислительной группы.

**1.2** Выполнить вставку гиперссылки (*HyperLink*), связать ее с файлом вычислительного документа **Maple**, записанного ранее на диск (например, файлом, в котором записана первая лабораторная работа).

**1.3** Выполнить вставку гиперссылки (*HyperLink*), связать ее с файлом текстового документа **Word**,

предварительно записанного на диск.

2 Освоить операции раздела *View*:

2.1 Установка маркеров – «закладок» (установить на выбранную позицию маркер и выполнить операцию *Bookmarkers*).

2.2 Освоить управление показом областей секций (*Show Section Ranges*) и групп (*Show Group Ranges*).

2.3 Выполнить вставку гиперссылки (*HyperLink*), связать ее с «закладкой», выполненной выше.

Все последующие пункты работы выполнять в виде секций и подсекций вычислительного документа.

3 Решить систему из трёх алгебраических уравнений аналитически, т.е. получить символьное решение, в общем виде относительно неизвестных **X1, X2, X3**:

$$A_{11} \cdot X_1 + A_{12} \cdot X_2 + A_{13} \cdot X_3 = B_1;$$

$$A_{21} \cdot X_1 + A_{22} \cdot X_2 + A_{23} \cdot X_3 = B_2;$$

$$A_{31} \cdot X_1 + A_{32} \cdot X_2 + A_{33} \cdot X_3 = B_3.$$

3.1 Записать систему уравнений и получить решение при помощи функции *solve*.

3.2 Решить эту же систему матричным способом. Сравнить результаты с п. 3.1. При необходимости упростить полученные аналитические выражения.

3.3 В одно из решений (в соответствии с вариантом) подставить значения коэффициентов из таблицы согласно варианта из файла «*Варианты заданий к пп. 3 и 4 лабораторной работы № 2*», за исключением указанного в таблице переменного коэффициента (далее в качестве примера приводится коэффициент **A32**). Получить зависимости, построить график изменения **X1** и **X2** от **A32** (переменного коэффициента). *Пределы изменения коэффициента A32 выбрать самостоятельно, но в них должно находиться значение A32 из таблицы заданий. Например, для варианта № 100 A32=-2, соответственно, пределы изменения абсциссы при построении графика могут быть такими:*

*A32 = -4 .. 0, т.е. -2 должно попадать в указанный диапазон.*

3.4 Переменному коэффициенту присвоить значение согласно варианта, получить решение системы в точке, т.е. значения **X1** и **X2** при заданных коэффициентах, сравнить с результатом, полученным из графика п.3.3.

4 Численно получить решение заданной в п.3 системы уравнений для указанных значений коэффициентов, сравнить с результатом п.3.4.

*При выполнении п.4 необходимо учесть, что если решать систему при помощи функции *solve* и использовать идентификаторы неизвестных такие же, как и в пп.3.1 или 3.2, то решения, полученные в этих пунктах, подставляются автоматически в систему уравнений, что преобразует её, очевидно, в систему равенств. Поэтому при выполнении п.4 следует выбрать иные идентификаторы для неизвестных, нежели в пп.3.1 и 3.2, либо перед выполнением этого пункта выполнить функцию *restart*.*

5 Выполнить статический анализ схемы согласно варианта (файл «*Варианты заданий к пп. 5 и 6 лабораторной работы № 2*»), получить значения напряжений всех узлов и токов всех ветвей.

5.1 Составить систему уравнений в соответствии с методом расчета, указанным в таблице с вариантами заданий.

5.2 Решить систему уравнений аналитически и получить аналитические выражения для расчёта потенциалов в узлах и токов во всех ветвях схемы.

5.3 Задать значения сопротивлений резисторов (кроме одного, указанного в таблице с вариантами заданий) и источников ЭДС и токов, получить значения токов и потенциалов как функции от сопротивления резистора, значение которого не задавалось.

5.4 Построить графики изменения тока в одной из ветвей и потенциала одного из узлов схемы в зависимости от изменения сопротивления резистора (т.е. того, значение которого не задавалось в п.5.3). Диапазон изменения сопротивления выбрать самостоятельно.

5.5 Задать значение сопротивления резистора (которое не задавали в п.5.3) из диапазона, выбранного в п.5.4, и получить численные значения токов и сопротивлений.

6 Получить численное решение системы уравнений п.5.1, задав изначально значения всех сопротивлений резисторов и источников потенциалов и токов (такие же, как в пп. 5.3 и 5.5) и решив, таким образом, численно систему уравнений, полученную в п.5.1 (т.е. этот пункт выполняется по аналогии с п.4). Сравнить полученное решение с результатами, полученными в пп.5.4 и 5.5.

7 Выполнить проверку расчёта по балансу мощностей.

*Выполнить факультативно. Систему уравнений п.5.1 решить относительно неизвестных значений сопротивлений резисторов при помощи функции solve, предполагая значения токов ветвей и потенциалы узлов заданными. При выборе неизвестных резисторов необходимо следить, чтобы система уравнений оставалась совместной, а уравнения – линейно независимыми. Рекомендуется обратить внимание на то обстоятельство, что СКМ Maple позволяет решать системы, в которых используются не только уравнения, но и неравенства. Подобная возможность, очевидно, позволяет выполнять параметрический синтез статических технических объектов.*

8 Сформулировать выводы по работе.

9 Сохранить результаты работы.

10 Подготовить отчет по работе.

### Лабораторная работа № 3

#### ***Математическое моделирование и автоматизация спектрального анализа сигналов***

***Цель работы:*** Освоение методов построения аналитических моделей спектров сигналов.

1 Описать заданный сигнал в виде кусочно-определенной функции  $f(x)$  в общем виде (использовать функцию **piecewise** пакета **Maple**).

2 Задать численные параметры сигнала в соответствии с вариантом задания.

3 Построить график полученной функции, убедиться в правильности описания сигнала.

4 Выполнить интегральное преобразование Фурье функции  $f(x)$

$$S := w \rightarrow \int_{-T}^T f(x) e^{-Iwx} dx$$

и получить аналитическую зависимость  $S(w)$  для спектральной плотности сигнала. Выполнить преобразование Фурье входного сигнала, воспользовавшись пакетом интегральных преобразований СКМ **Maple**. Сравнить результаты.

5 Построить графики полученных в п. 4 зависимостей. Пояснить полученные результаты.

6 Получить аналитические зависимости действительной и мнимой частей, амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик спектральной плотности, а также для коэффициентов разложения в ряд Фурье.

7 Распечатать первые 5 коэффициентов разложения в ряд Фурье. Построить графики полученных в п.6 зависимостей. Пояснить полученные результаты.

8 *Для самостоятельной проработки (факультативно).* Преобразовать исходный сигнал в чётную функцию и выполнить пп. 1–7 для чётной функции.

9 Выполнить преобразование Лапласа входного сигнала. Выполнить замену оператора  $p$  на  $j \cdot w$ . Сравнить с выражением спектральной плотности, полученным в п. 3.

10 Восстановить исходный сигнал из разложения в ряд Фурье, самостоятельно задавшись числом гармоник. Изменяя число гармоник, проследить за точностью восстановления сигнала.

11 *Для самостоятельной проработки (факультативно), выполнить задание п. 10 в режиме анимации.*

12 Сформулировать выводы по работе.

13 Сохранить результаты работы.

14 Подготовить и отчет по работе.

## Лабораторная работа № 4

### *Математические модели регрессионного анализа. Интерполяция и аппроксимация экспериментальных данных*

**Цель работы:** *Овладеть навыками первичной обработки экспериментальных данных, их интерполяции и аппроксимации аналитическими функциями, а также аппроксимации аналитических функций их полиномиальными аналогами с заданной точностью.*

#### **Получение статической модели полупроводникового диода**

В этой части лабораторной работы используются исходные данные из **таблицы 1** файла «Варианты заданий к лабораторной работе № 4» в соответствии с вариантом задания.

1 Создать 2 массива  $Ud$  и  $Id$ . Первый массив заполнить значениями напряжений, а второй – значениями токов, взятых из таблицы 1 в соответствии с вариантом.

2 Построить график прямой ветви зашумленной вольт-амперной характеристики полупроводникового диода по координатам экспериментальных точек, хранящимся в массивах  $Ud$  и  $Id$ .

3 Для зашумленной ВАХ диода получить интерполирующий полином, построить его график на одном поле вывода с исходной кривой, построенной в п. 2.

4 Для зашумленной ВАХ диода выполнить сплайн-интерполяцию, построить график полученной функции на одном поле вывода с исходной кривой, построенной в п. 2.

5 Выполнить полиномиальную аппроксимацию зашумленной ВАХ диода. Постепенно увеличивая порядок аппроксимирующего полинома от 2 до 5 понаблюдать приближение аппроксимирующего полинома к виду исходной кривой. Оптимальный порядок полинома выбрать самостоятельно. График аппроксимирующего полинома разместить на одном поле вывода с исходной кривой, построенной в п. 2.

6 Выполнить аппроксимацию зашумленной ВАХ диода функцией вида  $f(ud) = Is \cdot (e^{\frac{ud}{\lambda}} - 1)$ , где  $f(ud)$  – ток через диод,  $ud$  – напряжение на диоде. График аппроксимирующей функции разместить на одном поле вывода с исходной кривой, построенной в п. 2.

7 Сравнить результаты, полученные в пп. 3–6. Выбрать наиболее оптимальную из полученных моделей диода.

#### **Получение статической модели туннельного диода**

В этой части лабораторной работы используются исходные данные из **таблицы 2** файла «Варианты заданий к лабораторной работе № 4» в соответствии с вариантом задания.

8 Создать 2 массива  $Ud$  и  $Id$ . Первый массив заполнить значениями напряжений, а второй – значениями токов, взятых из таблицы 2 в соответствии с вариантом.

9 Построить график прямой ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода по координатам экспериментальных точек, хранящимся в массивах  $Ud$  и  $Id$ .

10 Выполнить полиномиальную аппроксимацию ВАХ туннельного диода. Постепенно увеличивая порядок аппроксимирующего полинома от 5 до 9 понаблюдать приближение аппроксимирующего полинома к виду исходной кривой. Оптимальный порядок полинома выбрать самостоятельно. График аппроксимирующего полинома разместить на одном поле вывода с исходной кривой, построенной в п. 9.

11 Выполнить аппроксимацию ВАХ туннельного диода функцией вида  $I(u) = A \cdot u \cdot e^{-\alpha u} + D \cdot (e^{\beta u} - 1)$ , где  $I(u)$  – ток через диод,  $u$  – напряжение на диоде. График аппроксимирующей функции разместить на одном поле вывода с исходной кривой, построенной в п. 9.

12 Сравнить результаты, полученные в пп. 9–11. Выбрать наиболее оптимальную из полученных моделей диода.

13 Сформулировать выводы по работе.

14 Сохранить результаты работы.

15 Подготовить отчет по работе.

## Лабораторная работа № 5

### Модели цифровой фильтрации сигналов

**Цель работы:** Освоение методов построения математических моделей дискретных интегральных преобразований сигналов и фильтрации данных на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ).

1 В качестве исходного сигнала использовать форму сигнала из Лабораторной работы № 3.

2 Описать массивы, в которые будет занесены оцифрованный исходный сигнал, сигнал шума, зашумлённый сигнал (действительная и мнимая части сигнала, при этом элементы мнимой части будут равны нулю), разложения в дискретный ряд Фурье. Число элементов массива должно быть равно  $2^n$ , где  $n$  – натуральное число  $\geq 4$ .

3 Задать и построить график исходного сигнала.

4 Оцифровать исходный сигнал и получить его дискретный спектр при помощи функции FFT.

5 Построить график модуля спектра сигнала, а также отдельно действительную и мнимую части спектра.

6 Выполнить обратное дискретное преобразование Фурье, воспользовавшись функцией iFFT, получить исходный сигнал и построить его график. Убедиться в том, что сигнал совпадает с исходным. Если сигнал сильно искажён, то, возможно, необходимо увеличить число точек его оцифровки.

*7 Для самостоятельной проработки. При выполнении задания п.6 внести изменения в спектр (например, убрав часть гармоник), восстановить сигнал и проанализировать форму восстановленного сигнала. Сделать выводы. Количественно оценить качество восстановления сигнала.*

8 Сгенерировать сигнал шума и наложить его на исходный сигнал. Параметр шума выбрать в соответствии с индивидуальным заданием.

9 Построить график зашумлённого сигнала.

10 Получить спектры зашумлённого сигнала и сигнала шума.

11 Выполнить анализ спектров и сделать вывод о том, какие гармоники разложения в дискретный ряд необходимо отфильтровать, чтобы восстановить сигнал и получить его форму, близкую к исходной.

12 Подобрать аналитическую функцию, при помощи которой будет аппроксимирована КЧХ фильтра, позволяющая отфильтровать сигнал шума.

13 Выполнить фильтрацию зашумлённого сигнала, восстановить сигнал, построить его график. Проанализировать и объяснить полученные результаты.

*14 Для самостоятельной проработки (выполнить факультативно):* подобрать аналитическую кривую, которая будет моделировать работу активного цифрового фильтра с требуемыми параметрами (т.е., например, некоторые гармоники можно усиливать).

15 Для самостоятельной проработки (выполнить факультативно): задать аналитически форму огибающей спектра и из него восстановить сигнал. Меняя форму огибающей спектра (действительной и мнимой частей), получить различные виды сигналов. Данный пункт задания выполнить как для непрерывного (интегрального, лабораторная работа № 3), так и для дискретного спектров. Сравнить результаты, сделать выводы.

16 Сформулировать выводы по работе.

17 Сохранить результаты работы.

18 Подготовить и отчет по работе.

## Лабораторная работа № 6

### ***Моделирование и анализ линейных динамических систем (спектральный анализ, передаточные функции, частотные характеристики)***

***Цель работы:*** *Овладеть навыками создания математических моделей и автоматизированных электронных документов анализа спектральных и частотных характеристик линейных динамических систем.*

1 Задать входной единичный сигнал  $V(IN)$  и построить его график. Параметры сигнала взять из временной диаграммы, представленной в файле «Временные диаграммы сигналов» в соответствии с вариантом задания.

2 Вычислить спектральную плотность сигнала и построить амплитудный и фазовый спектры сигнала.

3 Выполнить преобразование Лапласа входного сигнала.

4 Записать выражение для передаточной функции цепи. Параметры элементов и схему взять согласно варианту.

5 Выполнить умножение изображения входного сигнала на передаточную функцию.

6 Выполнить обратное преобразование Лапласа произведения п.5, в результате чего получить реакцию цепи на воздействие входного сигнала.

7 Получить переходную характеристику цепи.

8 Получить импульсную характеристику цепи.

9 Получить спектр выходного сигнала.

10 Построить графики выходного сигнала и его спектральной плотности. Сравнить график выходного сигнала с представленным на временной диаграмме в файле «Временные диаграммы сигналов» в соответствии с вариантом задания.

11 Построить графики АЧХ и ФЧХ цепи.

12 Задать математическую модель схемы в виде дифференциального уравнения, системы дифференциальных или алгебро-дифференциальных уравнений. Выполнить анализ реакции цепи на входной сигнал решением системы уравнений при нулевых начальных условиях.

13 Убедиться в идентичности результатов анализа, выполненного через интегральное преобразование Лапласа и путём решения дифференциального уравнения (системы уравнений).

14 Сформулировать выводы по работе.

15 Сохранить результаты работы.

16 Подготовить и отчет по работе.

## Лабораторная работа № 7

### *Автоматизация синтеза математических моделей и анализ устойчивости линейных динамических систем*

**Цель работы:** *Овладеть навыками создания автоматизированных электронных документов синтеза систем уравнений, автоматизированного получения передаточных функций в аналитическом виде, построения частотных годографов и методами анализа устойчивости линейных динамических систем.*

1 Подготовить чертёж заданной схемы, привести эквивалентную схему и её граф, поместить рисунки в отчёт.

2 Задать требуемые матрицы и вектора для схемы в соответствии с заданием.

3 Получить математическую модель цепи, т.е. систему уравнений в соответствии с заданным методом (контурных токов, узловых потенциалов или по законам Кирхгофа).

4 Получить уравнения фазовых переменных потока и потенциала.

5 Получить передаточную функцию по напряжению в операторном виде, как отношение изображения сигнала на выходном резисторе к изображению входного сигнала.

6 Задать значения параметров элементов, получить выражение для передаточной функции цепи.

7 Получить выражение для частотной характеристики цепи и построить графики АЧХ и ФЧХ цепи. На графиках задать логарифмическую шкалу частот с основанием 10 (десятичный логарифм). Уровень сигнала на графике АЧХ выразить в децибелах, фазу на графике ФЧХ – в градусах.

8 Задать входной сигнал в виде функции Хэвисайда и получить переходную и импульсную характеристики системы для передаточной функции, полученной в п.6.

9 Задать входной прямоугольный сигнал и получить реакцию системы, т.е. график выходного сигнала. Параметры входного сигнала взять из временной диаграммы, представленной в файле «Временные диаграммы сигналов и частотные характеристики» в соответствии с вариантом задания.

10 Задать входной сигнал в виде кусочно-определённой функции из лабораторной работы № 3 и построить график выходного сигнала. Период сигнала  $T$  задать таким же, как в п. 9, остальные временные параметры изменить пропорционально.

11 Получить выражения и построить графики изменения напряжения и тока на одном из элементов цепи (элемент цепи выбрать самостоятельно).

12 Выполнить анализ устойчивости системы: получить корни характеристического полинома, построить графики действительной и мнимой частей знаменателя АФЧХ, годографы Михайлова и Найквиста.

13 Сравнить полученные результаты анализа с графиками, представленными в файле «Временные диаграммы сигналов и частотные характеристики».

14 Сформулировать выводы по работе.

15 Сохранить результаты работы.

16 Подготовить отчет по работе.

## Лабораторная работа № 8

### *Математические модели в виде систем нестационарных дифференциальных уравнений*

**Цель работы:** *Овладеть навыками анализа технических систем, моделируемых системами нестационарных дифференциальных уравнений.*

- 1 В качестве исходной схемы взять вариант задания к лабораторной работе № 6.
- 2 Самостоятельно выбрать резистор, значение сопротивления которого будет изменяться ступенчато (рекомендуется в пределах 90–95 % от исходного значения). График изменения значения сопротивления задать самостоятельно, смоделировав его кусочно-определённой функцией.
- 3 Входной сигнал задать синусоидальным, его параметры выбрать самостоятельно. При этом необходимо подобрать частоту входного сигнала таким образом, чтобы на время моделирования приходилось примерно 5–10 периодов колебаний.
- 4 Построить графики входного сигнала и изменения сопротивления резистора.
- 5 Составить систему дифференциальных уравнений, описывающую моделируемую схему.
- 6 Выполнить моделирование, построить графики изменения токов и напряжений схемы (на выходном элементе обязательно!).
- 7 Сформулировать выводы по работе.
- 8 Сохранить результаты работы.
- 9 Подготовить отчет по работе.

## Лабораторная работа № 9

### *Математическое моделирование технических систем с нелинейными характеристиками*

**Цель работы:** *Овладеть навыками построения моделей нелинейного регрессионного анализа и моделирования технических систем с нелинейными характеристиками.*

#### Часть 1

#### **Исследование математической модели диодного ограничителя с графической вольт-амперной характеристикой**

- 1 Вольтамперную характеристику диода, для которой получена аналитическая аппроксимирующая кривая вида  $f(ud) = I_s \cdot (e^{\frac{ud}{\lambda}} - 1)$ , где  $f(ud)$  – ток через диод,  $ud$  – напряжение на диоде, использовать согласно варианту из лабораторной работы № 4.
- 2 Задать математическую модель в виде дифференциального уравнения или системы алгебро-дифференциальных уравнений и выполнить моделирование схемы при ступенчатом и гармоническом внешнем сигнале  $e(t)$ .
- 3 *Для самостоятельной проработки:* Исследовать влияние значений резистора и ёмкости на вид функции напряжения на емкости.
- 4 *Для самостоятельной проработки:* Получить спектр выходного сигнала при гармоническом вход-

ном сигнале. Сделать выводы.

### Исходные данные для выполнения первой части лабораторной работы

Исходными данными для работы являются:

1 Экспериментальная кривая вольт-амперной характеристики диода, полученная в ходе выполнения лабораторной работы № 4.

$e(t)$  – функция ЕДС – ступенчатая и гармоническая синусоидальная;

$R$  – сопротивление резистора;

$C$  – емкость конденсатора;

$U_0$  – начальное значение напряжения;

$T$  – время исследования импульсов.

Таблица 1.1 – Исходные данные

Для варианта	$C$ , мкФ	$R$ , Ом	$U_0$	$T$ , мкс	$e_0$ , В
Нечетные варианты	10	20	0	200	1
Четные варианты	11,2	19	0	210	1,1

### Описание математической модели

Электрическая цепь, приведенная на рисунке 1.1, описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{du(t)}{dt} = -\frac{1}{RC} \cdot u(t) - \frac{1}{C} \cdot f(ud) + \frac{1}{RC} \cdot e(t),$$

где  $u(t)$  – напряжение на конденсаторе:

Входной сигнал  $e(t)$  будем определять:

– по формуле:

$$e(t) = \begin{cases} e_0, & \text{при } 0 \leq t \leq 100 \text{ мкс} \\ 0, & \text{при } t > 100 \text{ мкс} \end{cases};$$

– в виде гармонического синусоидального сигнала (параметры задать самостоятельно).

### Схема цепи:

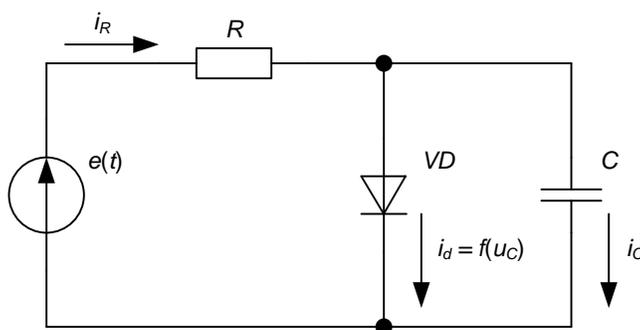


Рисунок 1 – Цепь с выпрямительным диодом

### Часть 2

#### Исследование математической модели электрической цепи с туннельным диодом

1 Вольтамперную характеристику диода, для которой получена аналитическая аппроксимирующая кривая вид

$$I(u) = A \cdot u \cdot e^{-\alpha \cdot u} + D \cdot (e^{\beta \cdot u} - 1),$$

где  $I(u)$  – ток через диод,  $u$  – напряжение на диоде, использовать согласно варианту из лабораторной работы № 4.

2 Задать математическую модель в виде системы алгебро-дифференциальных уравнений и выполнить моделирование схемы при постоянном и гармоническом внешнем сигнале  $e(t)$ .

3 *Для самостоятельной проработки:* Исследовать влияние значений резистора, индуктивности, ёмкости и входного постоянного сигнала на вид функции напряжения на емкости. Определить пределы параметров, при которых при постоянном внешнем сигнале колебательный процесс в схеме не наблюдается.

4 *Для самостоятельной проработки:* Получить спектр выходного сигнала. Сделать выводы.

### Исходные данные для выполнения второй части лабораторной работы

Исходными данными для лабораторной работы являются:

$E$  – ЕДС – для всех вариантов принять равным 0,3 В.

$R$  – сопротивление;

$C$  – ёмкость;

$L$  – индуктивность;

$u_0$  – начальное значение напряжения;

$i_0$  – начальное значение тока;

$T$  – время исследования.

Таблица 2.1 – Таблица исходных данных

Для варианта	C, нФ	R, Ом	L, нГн	T, мкс
Чётные варианты	10	10	100	4
Нечетные варианты	8,8	7	95	3,8

### Описание математической модели

Электрическая цепь, приведенная на рисунке 2.1, описывается системой дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{E(t) - i(t) \cdot R - u(t)}{L};$$

$$\frac{du(t)}{dt} = \frac{i - I(u)}{C}.$$

Функция для аппроксимации вольт-амперной характеристики диода имеет вид:

$$I(u) = A \cdot u \cdot e^{-\alpha \cdot u} + D \cdot (e^{\beta \cdot u} - 1).$$

При решении системы дифференциальных уравнений принять  $i_0$  и  $u_0$  (начальные значения тока и напряжения) равными 0.

### Схема цепи:

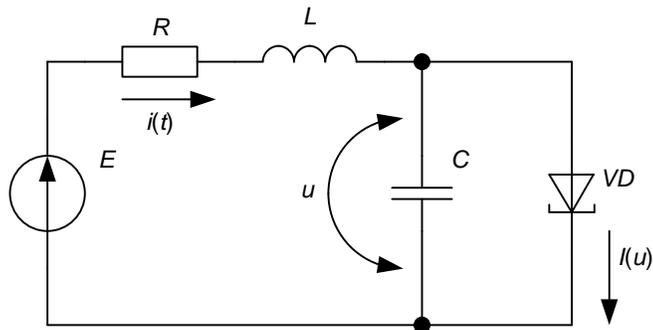


Рисунок 2 – Цепь с туннельным диодом

## Лабораторная работа № 10

### Освоение интерфейса и выполнение простейших вычислений в системе компьютерной математики MATLAB

**Цель работы:** Освоение интерфейса, управления окнами вывода и режимов работы в системе компьютерной математики MATLAB; освоение вычислений в командном и программном режимах.

#### Пункты 1 и 2 выполнить в командном режиме

##### 1 Вычисление арифметических выражений.

Присвоить значения переменным и вычислить значение арифметического выражения с использованием оператора присваивания в командном режиме. Данные взять из таблицы 1 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» в соответствии с вариантом задания.

##### 2 Создание векторов с использованием диапазона значений переменной.

Создать одномерный массив как диапазон с заданными пределами изменения. Массив должен содержать не менее 10 чисел. Сформировать новый одномерный массив, содержащий значения функции от элементов исходного массива. Данные взять из таблицы 1 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» в соответствии с вариантом задания.

#### Ниже перечисленные пункты выполнить в программном режиме (оформить в виде М-файлов)

##### 3 Обработка матриц и векторов.

В таблице 3 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» даны две матрицы  $A$  и  $B$ .

3.1 Создать вектор  $V1$  из второй строки матрицы  $A$ , вектор  $V2$  из третьего столбца матрицы  $B$  и вектор  $V3$  из второго столбца матрицы  $A$ .

3.2 Вычислить  $V1 \cdot V2$ ,  $A \cdot V2$ .

3.3 Вычислить  $A \cdot B$ ,  $A^{-1}$ ,  $A^{-1} \cdot A$ ,  $A^T$ ,  $B^T$ .

3.4 Вычислить определители  $A$  и  $B$ .

3.5 Выполнить поэлементное умножение  $V3 \cdot V2$  и  $A \cdot B$ .

##### 4 Вычисление сумм, произведений.

4.1 Вычислить сумму для выражения, представленного в таблице 4 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» в соответствии с вариантом задания.

4.2 Вычислить сумму элементов матрицы  $A$ . Сформировать вектор из сумм элементов столбцов матрицы  $B$ . Данные взять из таблицы 3 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» в соответствии

с вариантом задания.

4.3 Вычислить произведение элементов матрицы  $A$ .

4.4 Сформировать вектор из произведений элементов столбцов матрицы  $B$ .

4.5 Вычислить произведение для выражения, представленного в таблице 5 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» в соответствии с вариантом задания.

### 5 Вычисление интегралов различными методами.

Вычислить определенный интеграл методом трапеций и методом Симпсона. Данные взять из таблицы 6 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» в соответствии с вариантом задания.

### 6 Решение уравнений и систем алгебраических уравнений.

6.1 Найти корень уравнения с применением функции  $fzero$ , используя заданное начальное значение:

$\sqrt{2x+5} + \sqrt{5x+6} = \sqrt{12x+25}$	$x \approx 1$
---	---------------

6.2 Вычислить множество корней уравнения с использованием функции  $roots$ :

$$x^4 - 5.67x^3 - 1.906x^2 + 15.81x + 3.282 = 0.$$

6.3 Решить систему линейных уравнений матричным методом. Данные взять из таблицы 7 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» в соответствии с вариантом задания.

7 Вычислить множество значений заданных функций, если значения их аргументов изменяются от  $a$  до  $b$  с шагом  $h$ . Данные взять из таблицы 8 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» в соответствии с вариантом задания.

8 Определить множество значений кусочно-непрерывной функции. Изменение значений ее аргумента  $x_n$  и  $x_k$ , а также шаг  $dx$  задать самостоятельно. Данные взять из таблицы 9 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» в соответствии с вариантом задания.

## Графика в *MatLab*

9 Построить график первой функции из таблицы 10 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» согласно варианту задания в заданных пределах изменения ее аргумента.

10 Построить на одном поле графики двух функций из таблицы 10 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10», промаркировать точки графиков, задать типы линий, подписать оси и весь график, создать легенду, нанести координатную сетку, нанести на график произвольный текст.

11 Разбить графическое окно на 4 области, в которых построить графики из пунктов 9, 10, а также графики функций  $y = \sin(x)$  и  $y = \cos(x)$ .

12. Построить график кусочно-непрерывной функции. Пределы изменения аргумента подобрать так, чтобы перекрывались все три диапазона. При задании вида функции необходимо использовать программный фрагмент, нанести координатную сетку, оцифровать оси, задать легенду для каждой линии графика, сделать надписи по осям и заголовок графика, изменить тип, цвет, толщину линии графика, нанести маркеры на линии графика. Данные взять из таблицы 9 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» в соответствии с вариантом задания.

13 Разбить графическое окно на 6 областей, в каждой из которых построить график заданной поверхности, используя функцию из таблицы 11 в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 10» и следующие команды *MatLab*:

- `plot3(X,Y,Z);`
- `mesh(X,Y,Z);`
- `meshc(X,Y,Z);`
- `meshz(X,Y,Z);`
- `surf(X,Y,Z);`
- `surfc(X,Y,Z);`

–  $\text{surfl}(X,Y,Z)$ .

#### 14 Сделать выводы по работе.

15 Оформить отчёт (только по части 2 лабораторной работы), в отчёте привести тексты  $M$ -файлов, результаты вычислений, выполненных как в командном, так и в программном режимах.

## Лабораторная работа № 11

### **Математическое моделирование линейных динамических стационарных систем и анализ их динамических и частотных характеристик в ППП Control System Toolbox СКМ MATLAB**

**Цель работы:** Ознакомление с динамическими и частотными характеристиками систем автоматического управления (САУ) и получение навыков интерактивного исследования линейных динамических моделей.

#### 1 Постановка задачи

В качестве объекта исследования выбраны линейные (линеаризованные) динамические стационарные системы управления с одним входом и одним выходом. При этом модель одномерной САУ задана в виде комплексной передаточной функции, записанной как отношение полиномов

$$W(p) = \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0}.$$

Необходимо:

- 1 Определить полюса и нули передаточной функции  $s_j^*, (i = \overline{1, n}), s_j^0, (i = \overline{1, m})$ .
- 2 Записать дифференциальное уравнение, определяющее функционирование САУ.
- 3 Построить графики переходной и импульсной характеристик  $h(t), \delta(t)$ .
- 4 Построить логарифмические частотные характеристики  $L(\omega)$ .
- 5 Построить частотный годограф Найквиста  $W(i\omega), \omega = [0, \infty]$ .
- 6 Построить карту нулей и полюсов передаточной функции (при выполнении анализа в режиме *LTIVIEW*).

#### 2 Сведения по работе с ППП Control System Toolbox

Для выполнения лабораторной работы используется пакет прикладных программ (ППП) *Control System Toolbox (CST)*. ППП предназначен для работы с *LTI*-моделями (*Linear Time Invariant Models* – линейными инвариантными моделями) технических систем и систем управления.

MatLab позволяет выполнить требуемый анализ несколькими способами:

- в интерактивном режиме, задавая команды ППП в командном режиме из *Command Window*;
- в программном режиме, организовав  $m$ -файл или пользовательский *GUI*-интерфейс;
- используя графический интерфейс ППП *CST*, который называется *LTI viewer*;
- в режиме визуального моделирования пакета *Simulink*, создав файл моделирования *Model*.

Выбор способа анализа при решении прикладных инженерных задач моделирования определяется пользователем исходя из особенностей постановки задачи. При этом сложные и ответственные системы рекомендуется моделировать в различных режимах и сравнивать результаты моделирования.

В работе необходимо последовательно изучить и использовать все четыре указанных способа анализа.

В ППП *Control System Toolbox* имеется тип данных, определяющий динамическую систему в виде

комплексной передаточной функции. Синтаксис команды *tf*, создающий в интерактивном режиме из *Command Window* LTI-систему с одним входом и одним выходом в виде передаточной функции:

```
>> W = tf([b_m, ..., b_1, b_0], [a_n, ..., a_1, a_0])
```

где  $b_m, \dots, b_0$  – значения коэффициентов полинома  $B$  числителя передаточной функции,  $a_n, \dots, a_0$  – значения коэффициентов полинома  $A$  знаменателя.

В результате в переменную  $W$  записывается LTI-система в виде передаточной функции. Коэффициенты можно разделять запятой или знаком пробела.

В окне вывода *Workspace* можно просмотреть созданную переменную.

Ниже показан пример создания двух LTI-систем с одинаковыми передаточными функциями, которые записаны в переменные  $W$  и  $H$ :

```
>> W = tf([1 3], [5 7 1 2])
```

Transfer function:

$s + 3$

-----  
 $5 s^3 + 7 s^2 + s + 2$

```
>> H = tf([1,3], [5,7,1,2])
```

Transfer function:

$s + 3$

-----  
 $5 s^3 + 7 s^2 + s + 2$

## 2.1 Интерактивный режим моделирования линейных динамических стационарных систем

Для выполнения работы необходимо использовать команды, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Основные команды ППП *Control System Toolbox*

Синтаксис	Описание
<i>pole</i> (<LTI-объект>)	Вычисление полюсов передаточной функции
<i>zero</i> (<LTI-объект>)	Вычисление нулей передаточной функции
<i>step</i> (<LTI-объект>)	Построение графика переходной характеристики
<i>impulse</i> (<LTI-объект>)	Построение графика импульсной характеристики
<i>bode</i> (<LTI-объект>)	Построение логарифмических частотных характеристик (диаграммы Боде)
<i>nyquist</i> (<LTI-объект>)	Построение частотного годографа Найквиста

Пример применения команды *step*:

```
>> W = tf([1 3], [1 7 1 2])
```

Transfer function:

$s + 3$

-----  
 $1 s^3 + 7 s^2 + s + 2$

```
>> step(W)
```

Здесь  $W$  – передаточная функция технического объекта, созданная по команде *tf*.

В результате выполнения приведенного выше кода будет открыто окно с изображенным графиком переходной характеристики (рисунок 1).

Для определения полюсов передаточной функции (корней полинома знаменателя передаточной функции) используется функция *pole*:

```
>> pole(W)
```

```
ans =
```

```
-6.8971 + 0.0000i  
-0.0515 + 0.5360i  
-0.0515 - 0.5360i
```

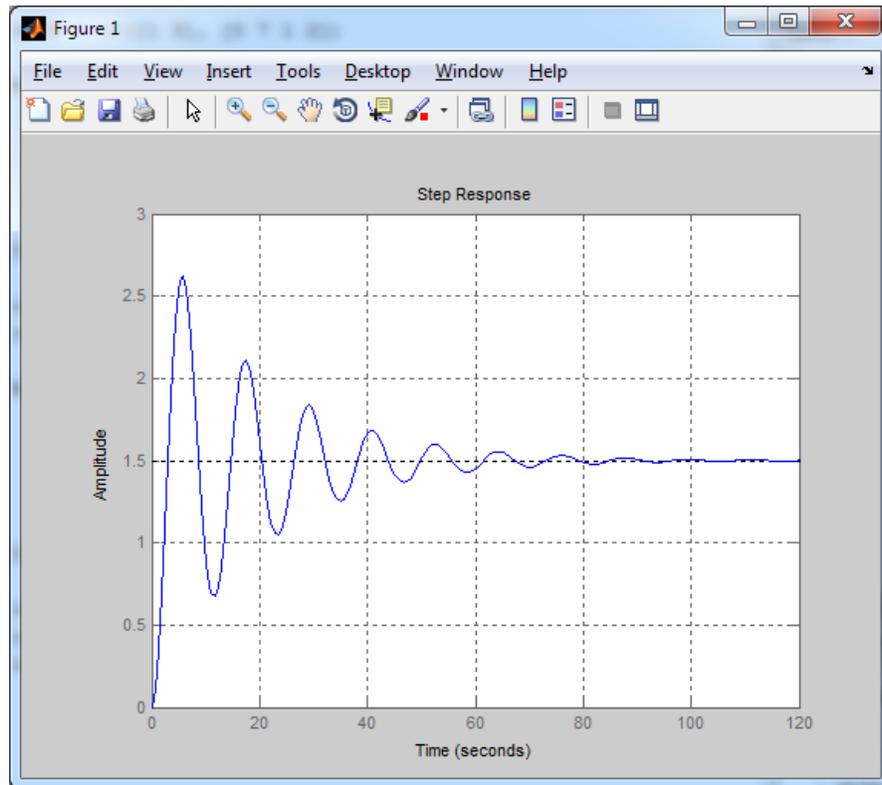


Рисунок 1 – График переходной характеристики системы

Чтобы определить нули передаточной функции (корней полинома числителя передаточной функции) необходимо воспользоваться функцией *zero*:

```
>> zero(W)
```

```
ans =
```

```
-3
```

Приведённые выше команды могут быть организованы в программный фрагмент, записаны в *m*-файл и затем запущены на выполнение, как программа.

## 2.2 Использование графического интерфейса ППП *CST – LTI viewer*

Использование графического интерфейса ППП *CST – LTI viewer* осуществляется вызовом команды из *Command Window*:

```
>> ltiview(W)
```

В результате на экран дисплея будет выведено окно *LTI viewer* (рисунок 2).

Графический интерфейс, работа с которым вполне очевидна, позволяет выполнить основные команды ППП *CST* и представить результаты анализа в компактном графическом виде. Опция *Edit* → *Plot configuration* (рисунок 3) позволяет изменять конфигурацию выводимых окон и анализируемых параметров в каждом из них. Например, можно указать два окна вывода, в первом из которых будет показан график переходной характеристики, а во втором – карта нулей и полюсов (рисунок 4).

Время моделирования, частотный диапазон и другие параметры моделирования пакет подбирает автоматически, но при необходимости указанные параметры пользователь может задать явно, воспользовавшись опцией *Edit*→*Viewer Preferences*→*Parameters*.

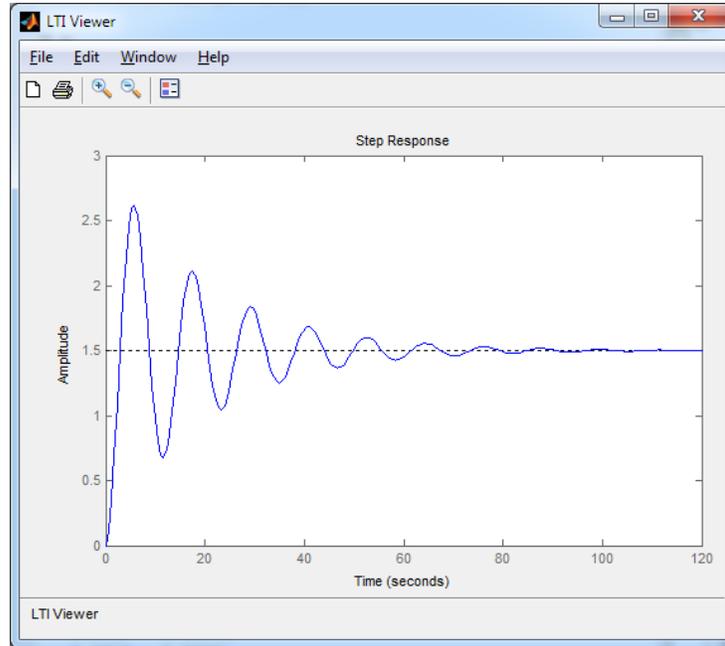


Рисунок 2 – Окно графического интерфейса *LTI viewer*

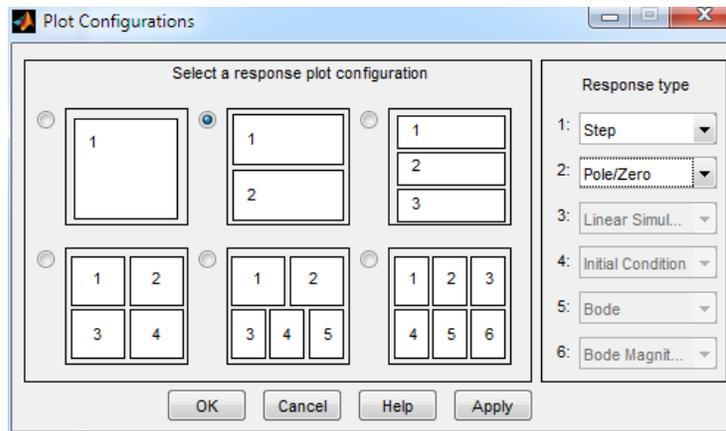


Рисунок 3 – Окно конфигурирования параметров выводимых окон графического интерфейса *LTI viewer*

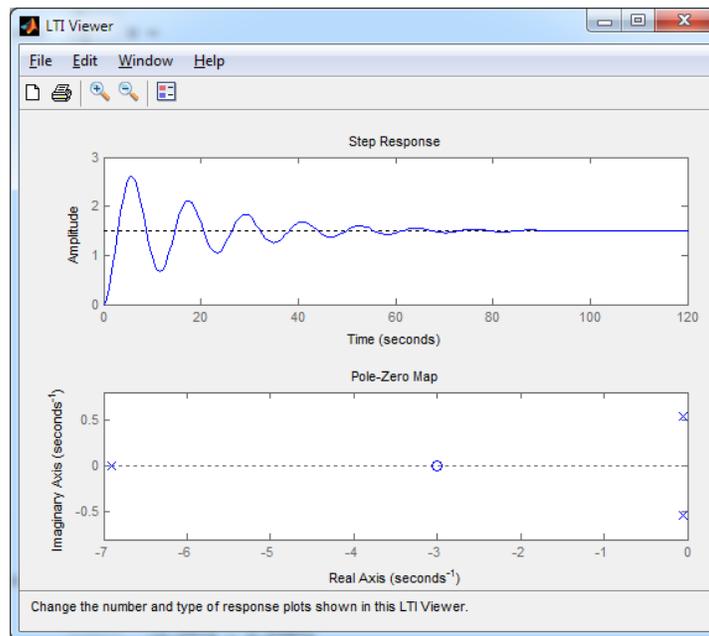


Рисунок 4 – Окно графического интерфейса *LTI viewer* с изображением переходной характеристики и карты нулей и полюсов

### 2.3 Режим визуального моделирования пакета *Simulink*

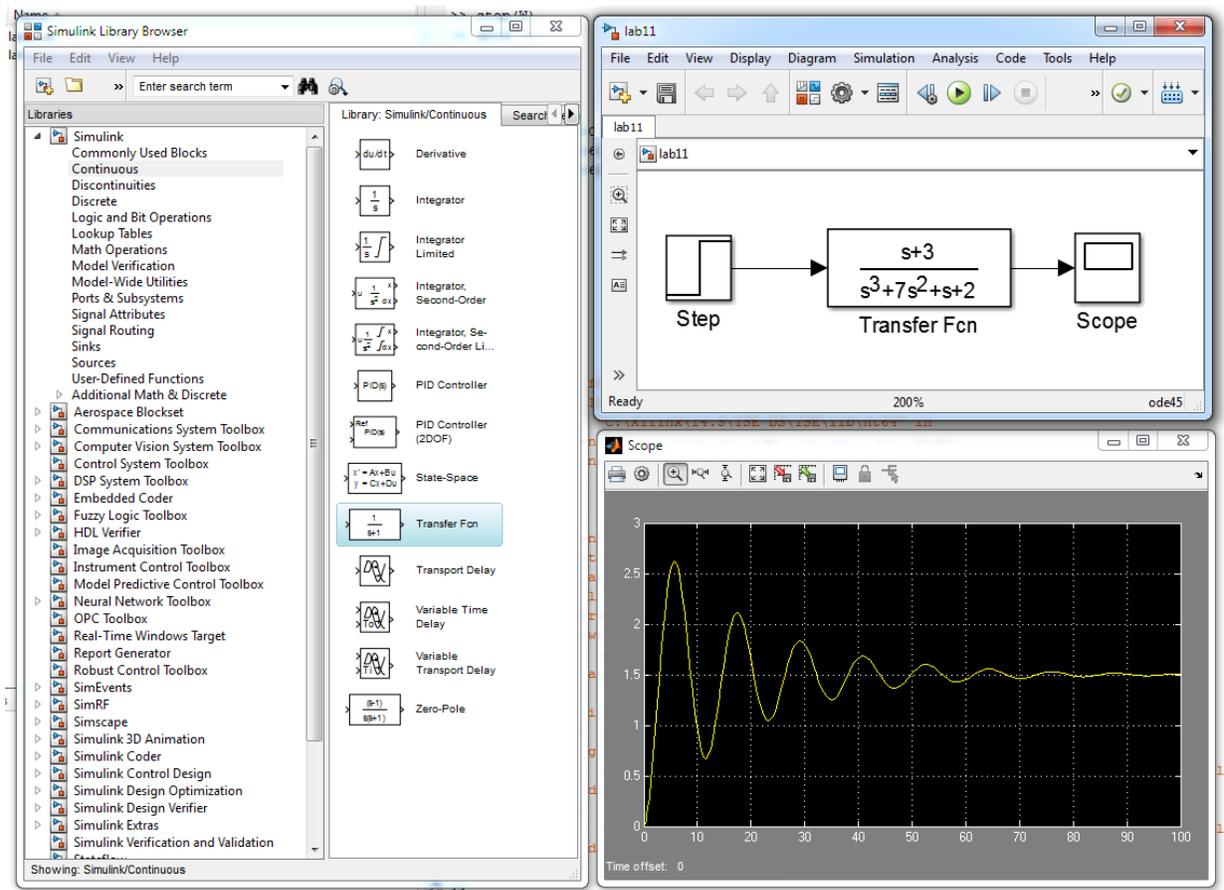
Описание работы с *Simulink* приведено в файле «ПРИЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В SIMULINK», здесь отметим только те графические блоки, которые понадобятся для выполнения работы, и библиотеки, в которых они расположены:

- блоки задания передаточных функций *Transfer Fnc*, а также интегрирования (*Integrator*) и дифференцирования (*Derivative*) функций находятся в библиотеке *Continuous*;
- блок задания функции Хэвисайда *Step* расположен в библиотеке *Sources*;
- блок визуализации результатов моделирования *Scope* – библиотека *Sinks*.

Параметры моделирования устанавливаются опциями *Simulation – Configuration Parameters* окна моделирования.

Требуемые блоки устанавливаются переносом их мышкой в окно моделирования, соединяются между собой, затем устанавливаются параметры блоков и моделирования (для настоящей работы – только время моделирования). Вызов окна задания параметров блока осуществляется двойным щелчком мыши на его изображении.

После запуска на моделирование, если система не выдала ошибок, двойным щелчком мыши на блок *Scope* вызывается график моделируемой кривой:



### 3 Последовательность выполнения лабораторной работы

- 1 Создать *LTI*-объект, в соответствии с заданным вариантом.
- 2 Составить дифференциальное уравнение, определяющее функционирование САУ, и соответствующее передаточной функции задания.
- 3 Определить полюса передаточной функции  $s_j^*, (i = \overline{1, n})$  с использованием команды *pole*. Сделать вывод об устойчивости технической системы, моделируемой указанной передаточной функцией.
- 4 Определить нули передаточной функции  $s_j^0, (i = \overline{1, m})$  с использованием команды *zero*.
- 5 Получить динамические характеристики – переходную функцию  $h(t)$ , импульсную функцию  $\delta(t)$  и частотные характеристики – диаграмму Боде и частотный годограф Найквиста. Сделать вывод о поведении моделируемого объекта (переходной процесс сходящийся или расходящийся, величина и число перерегулирований, устойчивость).
- 6 Создать программу *m*-файла для анализа технических объектов в соответствии с заданиями пп. 1, 3–5.
- 7 Используя *LTI-viewer* выполнить анализ согласно пп. 3–5 для передаточной функции, полученной в лабораторной работе № 6: получить переходную и импульсную характеристики, частотную характеристику, годограф Найквиста, карту нулей и полюсов. Сравнить с переходной характеристикой, полученной в СКМ *Maple*.
- 8 Выполнить анализ передаточной функции из лабораторной работы № 7 в *LTI viewer*: получить переходную и импульсную характеристики, частотную характеристику, годограф Найквиста, карту нулей и полюсов.

9 В пакете *Simulink* получить переходную характеристику передаточной функции из лабораторной работы № 7. Сравнить результаты моделирования, сделать выводы.

10 Оформить отчет. В отчете необходимо привести исходные данные к работе, команды и результаты моделирования, рисунки схем из *Simulink*, сравнение результатов моделирования, полученных различными способами, обоснованные выводы по работе. **Внимание!!!** При оформлении отчета выполнять копирование графической информации методами, изложенными в файле «Методы копирования графической информации из СКМ *MatLab*». Отчеты, содержащие экранные копии окон со схемами и графиками функций пакета *Control System Toolbox* («скриншоты») будут возвращены на доработку.

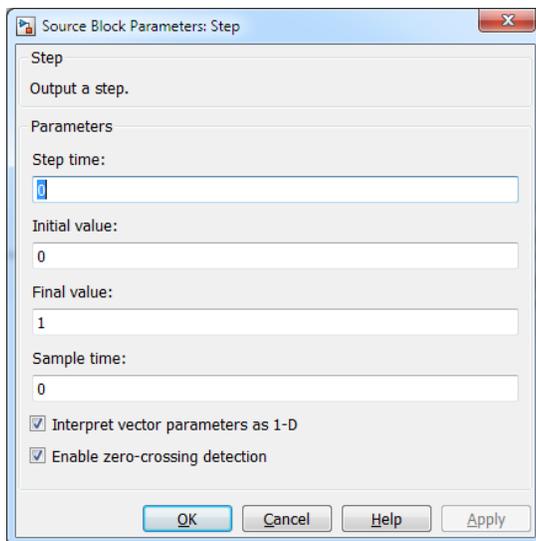
## Лабораторная работа № 12

### *Визуализированные модели нелинейных динамических систем в системе компьютерной математики MatLab*

**Цель работы:** Получение навыков визуального моделирования технических систем, содержащих нелинейные блоки.

#### Последовательность выполнения лабораторной работы

1 В пакете *Simulink* построить модель, содержащую линейное звено (компонент *Transfer Fcn*), описанное передаточной функцией, взятой из лабораторной работы № 7, источник ступенчатого сигнала *Step* и компонент *Scope*. Источник *Step* подключить на вход линейного звена, а компонент *Scope* – на выход линейного звена. Параметры передаточной функции описать в отдельном *m*-файле. Время моделирования выбрать таким же, как в лабораторной работе № 7. Задать параметры источника *Step* задан в соответствии с рисунком:



Выполнить моделирование работы системы и получить график ее переходной характеристики. Сравнить этот график с полученным в лабораторной работе № 7. Сделать выводы.

2 Ввести в систему 100-процентную отрицательную обратную связь (ООС). Получить график переходной характеристики. Обосновать влияние ООС на поведение системы.

3 Включить в разрыв цепи обратной связи линейное звено с насыщением (*Saturation*). Подобрать параметры звена таким образом, чтобы установившееся значение выходного сигнала замкнутой системы (построенной в п. 2) находилось приблизительно в середине характеристики звена, а верхний и нижний пре-

делу звена должны ограничивать колебания выходного сигнала системы. Получить графики выходных сигналов системы и звена *Saturation*. Сделать выводы о влиянии линейного звена с насыщением на поведение системы.

4 Включить в разрыв цепи обратной связи линейное звено с зоной нечувствительности (*Dead Zone*). Подобрать параметры звена таким образом, чтобы установившееся значение выходного сигнала разомкнутой системы (построенной в п. 1) находилось приблизительно в середине характеристики звена, а первые 3, 4 колебания выходного сигнала системы выходили за границы зоны нечувствительности. Получить графики выходных сигналов системы и звена *Dead Zone*. Сделать выводы о влиянии линейного звена с зоной нечувствительности на поведение системы.

5 Включить в разрыв цепи обратной связи релейное неоднозначное звено (*Relay*). Порог включения реле (параметр *Switch on point*) и уровень сигнала на выходе во включенном состоянии (параметр *Output when on*) задать равными параметру *Upper limit* для звена *Saturation* из пункта 3. Порог выключения реле (параметр *Switch off point*) и уровень сигнала на выходе в выключенном состоянии (параметр *Output when off*) задать равными параметру *Lower limit* для звена *Saturation*. Получить графики выходных сигналов системы и звена *Dead Zone*. Сделать выводы о влиянии линейного звена с зоной нечувствительности на поведение системы.

6 Оформить отчет. В отчете необходимо привести исходные данные к работе, содержимое m-файла с параметрами передаточной функции системы, рисунки схем из *Simulink*, результаты моделирования, обоснованные выводы по работе. **Внимание!!!** При оформлении отчета выполнять копирование схем методом, изложенным в файле «Методы копирования графической информации из СКМ *MatLab*» приложенном к лабораторной работе № 11. Отчеты, содержащие экранные копии окон со схемами («скриншоты») будут возвращены на доработку.

## Лабораторная работа № 13

### ***Автоматизация моделирования и оптимизация линейных стационарных систем автоматического регулирования технических объектов***

***Цель работы:*** *Овладеть навыками автоматизации математического моделирования систем автоматического управления технических объектов, а также принципами оптимизации параметров систем.*

1 По принципиальной схеме системы автоматического регулирования (САР) и объекта управления подготовить её структурную схему, на которой необходимо указать все функциональные элементы системы с входными и выходными сигналами, а также управляющие и возмущающие воздействия.

2 По системе алгебро-дифференциальных уравнений получить в символьном виде:

- а) передаточные функции каждого элемента САР;
- б) передаточную функцию замкнутой системы по управляющему воздействию.

3 Рассчитать корни характеристического полинома передаточной функции замкнутой системы по управляющему воздействию. Оценить устойчивость САР и сделать предварительные выводы об устойчивости САУ и ожидаемом характере переходной, импульсной и частотной характеристик. Если система окажется неустойчивой, необходимо добиться ее устойчивого поведения путем изменения параметров элементов, **не относящихся к объекту управления.**

4 Получить переходную, импульсную и частотные характеристики САР, а также построить её годограф, воспользовавшись модулем *lti* СКМ *MatLab*. Сделать выводы о качестве регулирования САР.

5 В пакете Simulink системы компьютерной математики (СКМ) MatLab подготовить визуализированную модель САР технической системы. Первоначальные параметры системы задать в соответствии с указанным вариантом.

6 Выполнить моделирование работы САР при ступенчатом изменении управляющего и возмущающего воздействий. Начальные значения воздействий задать равными 0. Конечное значение возмущающего воздействия взять из таблицы параметров в соответствии с вариантом задания. Конечное значение задающего воздействия выбрать таким образом, чтобы выходной сигнал объекта управления принимал заданное в таблице параметров значение. Моменты изменения задающего и возмущающего воздействий разнести во времени, т.е. переходные процессы, вызванные каждым изменением, не должны накладываться.

7 Изменяя коэффициенты усиления элементов САР (в первую очередь блоков усиления сигнала рассогласования) оптимизировать параметры САР, т.е. подобрать параметры системы, при которых в системе будет происходить:

- а) колебательный затухающий процесс;
- б) затухающий процесс с одним переуправлением.

Проследить, как при этом изменяется расположение нулей и полюсов (корни характеристического полинома) на карте нулей и полюсов. Использовать функции расчёта корней полинома и/или модуль Iti СКМ MatLab.

8 Оформить отчет. В отчете необходимо привести исходные данные к работе, содержимое m-файла с параметрами передаточных функций системы, рисунки схем из *Simulink*, результаты моделирования, обоснованные выводы по работе. **Внимание!!!** При оформлении отчета выполнять копирование схем методом, изложенным в файле «Методы копирования графической информации из СКМ *MatLab*» приложенном к лабораторной работе № 11. Отчеты, содержащие экранные копии окон со схемами («скриншоты») будут возвращены на доработку.

## Лабораторная работа № 14

### *Статический анализ и анализ переходных процессов в САПР*

**Цель работы:** *Овладеть навыками анализа линейных цепей в пакете OrCAD.*

1 На диске создать раздел, в котором будут храниться Ваши проекты лабораторных работ, выполняемых в **OrCAD**. **Внимание!** Имена создаваемых проектов, а также все поддиректории доступа к проектам и файлам должны содержать только латинские буквы и цифры!

2 Освоить интерфейс редактора **Capture CIS** пакета **OrCAD**.

3 Создать проект и подготовить чертёж схемы в редакторе **OrCAD Capture CIS**. **Чертёж схемы, номиналы элементов и источников токов и ЭДС** взять в соответствии с **Вашим вариантом из лабораторной работы № 2**.

4 Чертёж схемы с параметрами элементов скопировать в отчет.

5 Выполнить статический анализ схемы, получить значения напряжений всех узлов и токов всех ветвей. Перед выполнением процесса моделирования в программе **PSpice** задать следующие установки:

- выбрать пункт меню Edit Simulation Profile;
- задать вид моделирования DC Sweep;
- выбрать опцию моделирования Primary Sweep;
- указать имя источника ЭДС или тока, выходная величина которого будет изменяться в процессе моделирования. Диапазон изменения выходной величины должен быть линейным и охватывать значение, заданное во второй лабораторной работе предыдущего семестра;
- запустить процесс моделирования, нажав кнопку Run PSpice.

6 С помощью маркеров токов и напряжений, установленных в окне редактора **Capture CIS**, получить

зависимости токов в ветвях и потенциалов узлов схемы от выходной величины источника. Графики напряжений (потенциалов) и токов разнести на разные координатные плоскости.

7 Используя опцию курсора программы **PSpice A/D**, определить значения напряжений и токов при заданном в лабораторной работе № 2 значении параметра источника тока или ЭДС.

8 Чертёж схемы с параметрами элементов, а также значениями токов и напряжений сохранить в формате **Word** для подготовки отчёта. В выводах по работе необходимо сравнить значения токов и напряжений, полученные в **OrCAD**, с результатом анализа схемы, выполненного в СКМ **Maple**.

9 Подготовить чертёж схемы в редакторе **OrCAD Capture CIS** из лабораторной работы № 6.

10 На вход схемы подключить источник импульсного сигнала VPULSE. Параметры источника задать в соответствии с заданием к лабораторной работе № 6.

11 Выполнить анализ переходных процессов в схеме, получить график изменения выходного напряжения. Перед выполнением моделирования в программе **PSpice** задать следующие установки:

- выбрать пункт меню Edit Simulation Profile;
- задать тип моделирования Time Domain (Transient),
- выбрать опцию моделирования General Settings;
- задать время моделирования, которое должно составлять 4–5 периодов следования входных импульсов;
- запустить процесс моделирования, нажав кнопку Run PSpice;
- при необходимости указать максимальный шаг времени моделирования.

12 Диаграммы напряжений сохранить в формате **Word** для подготовки отчёта.

13 Сделать выводы по работе. В выводах результаты настоящей лабораторной работы сравнить с результатами, полученными в предыдущих работах в СКМ **Maple**.

14 Подготовить отчёт по работе. Отчет должен содержать задание к лабораторной работе и чертежи исходных схем с параметрами элементов, результаты статического и динамического моделирования, комментарии к ходу выполняемой работы, сравнение с результатами моделирования в СКМ **Maple**, обоснованные и доказательные выводы по работе.

**Внимание!!!** При оформлении отчета выполнять копирование графической информации методами, изложенными в файле «Обработка результатов моделирования и копирование графической информации из программ пакета *OrCAD*». Отчеты, содержащие экранные копии окон со схемами и диаграммами («скриншоты») будут возвращены на доработку.

## Лабораторная работа № 15

### *Спектральный и частотный анализ технических систем в САПР*

**Цель работы:** *Овладеть навыками спектрального и частотного анализа электрических цепей в пакете OrCAD.*

1 Для выполнения лабораторной работы создать новый проект.

2 Создать проект и подготовить чертёж схемы в редакторе **OrCAD Capture CIS**. **Чертёж схемы, номиналы элементов и источника сигналов взять в соответствии с Вашим вариантом из лабораторной работы № 7.**

3 Выполнить анализ переходных процессов и получить переходную характеристику фильтра. Для этого на вход схемы подать прямоугольный сигнал от источника импульсного напряжения VPULSE.

4 Построить графики изменения напряжений на входе и выходе схемы, а также тока на резисторе RS. Диаграммы напряжений и тока сохранить в редакторе Word для подготовки отчёта.

5 После того как будут получены и сохранены для отчёта графики входного и выходного сигналов, выполнить спектральный анализ. Для этого, **не выходя!** из режима просмотра результатов анализа переход-

ных процессов использовать опцию выполнения спектрального анализа программы PSpice: нажать на «иконку» FFT. На поле вывода результатов моделирования временные графики выходных процессов будут заменены на графики спектров соответствующих сигналов. Сравнить спектры входного и выходного сигналов, сделать выводы.

6 Графики спектров сигналов сохранить в редакторе Word для подготовки отчёта.

7 Для выполнения частотного анализа на вход схемы подать гармонический сигнал от источника гармонического напряжения VAC. Амплитуду сигнала задать равной 1 В, а постоянную составляющую задать равной нулю.

8 Перед выполнением процесса моделирования в программе PSpice задать следующие установки:

- в Edit Simulation Profile опции Analysis Type задать тип моделирования AC Sweep/Noise;
- в AC Sweep Type указать частотный диапазон анализа: начальную и конечную частоты, а также число точек для выполнения анализа и построения графика;
- анализ выполнить с линейной и логарифмической шкалами построения частотных графиков.

9 Выполнить моделирование и получить графики амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик схемы. Графики АЧХ представить в абсолютных (выраженных в вольтах или амперах) и относительных (выраженных в децибеллах) величинах.

10 Графики сохранить в формате Word для подготовки отчёта.

11 Самостоятельно внести изменения в схему и трансформировать исходный фильтр в полосовой.

12 Выполнить анализ переходных процессов и частотных характеристик и доказать, что видоизмененная схема – схема полосового фильтра.

13 Исходные данные к лабораторной работе, чертежи схем, подготовленные в редакторе Capture и результаты моделирования представить в отчёте.

14 Сделать выводы по работе и подготовить отчёт. Отчет должен содержать задание к лабораторной работе и чертежи исходных схем с параметрами элементов, результаты анализа переходных процессов, спектрального и частотного моделирования, комментарии к ходу выполняемой работы, обоснованные и доказательные выводы по работе. В выводах к лабораторной работе результаты настоящей лабораторной работы необходимо сравнить с результатами, полученными в СКМ Maple.

**Внимание!!!** При оформлении отчета выполнять копирование графической информации методами, изложенными в файле «Обработка результатов моделирования и копирование графической информации из программ пакета OrCAD». Отчеты, содержащие экранные копии окон со схемами и диаграммами («скриншоты») будут возвращены на доработку.

## Лабораторная работа № 16

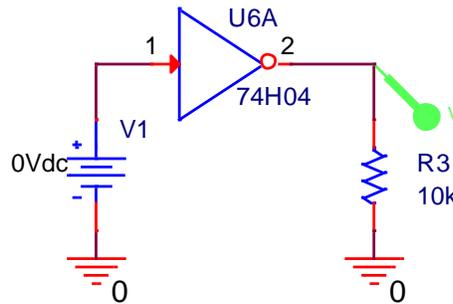
### *Анализ цифровых и цифро-аналоговых схем в пакете OrCAD*

**Цель работы:** *Овладеть навыками анализа цифровых и цифро-аналоговых цепей в пакете OrCAD.*

1 Создать новый проект с пустой страницей. На странице поместить инвертор (элемент НЕ) в соответствии с заданной по варианту серией цифровых ИМС. К входу инвертора подключить источник постоянного напряжения, а выход нагрузить резистором сопротивлением не менее 10 кОм.

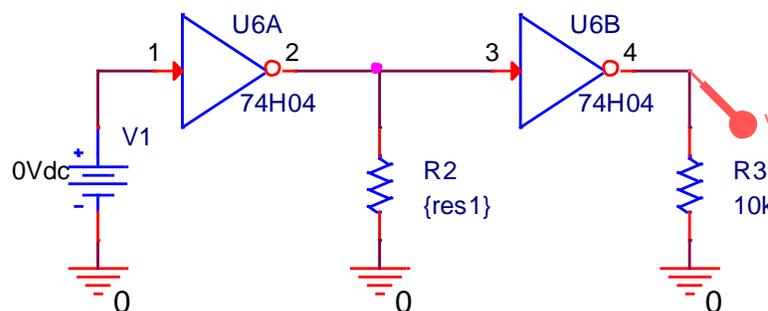
2 Определить пороговые напряжения переключения элемента. Для этого воспользоваться анализом по постоянному току. Диапазон изменения напряжения источника задать 0...5 В. Шаг изменения 0,01 В. По

графику зависимости выходного напряжения инвертора от напряжения источника определить, при каких уровнях напряжения источника инвертор переключается из начального устойчивого состояния (лог. «1») в неопределенное и из неопределенного состояния в конечное устойчивое (лог. «0»). Для определения пороговых напряжений по графику использовать курсор.



3 Определить, при каких значениях сопротивления нагрузки на выходе инвертора появляется неопределенное состояние; состояние выхода изменяется на противоположное. Для этого к выходу анализируемого инвертора подключить инвертор из той же серии, нагруженный резистором сопротивлением 10 кОм. Напряжение источника задать равным 0 В (лог. «0»). С помощью компонента «PARAMETERS» из библиотеки *SPECIAL* создать глобальный параметр с произвольным именем (например, *res1*). **Внимание!!!** Имя параметра не должно совпадать с именами параметров моделей и обозначениями компонентов на схеме. Так, не допускается называть параметр *res* или *r*. В поле сопротивления нагрузочного резистора анализируемого инвертора ввести имя созданного глобального параметра, заключенное в фигурные скобки (например,  $\{res1\}$ ). В опциях моделирования выбрать анализ по постоянному току, в качестве изменяемой величины указать имя созданного ранее глобального параметра (**без фигурных скобок !!!**). Диапазон изменения параметра задать 1...400 Ом. Шаг изменения 0,1 Ом. По графику зависимости выходного напряжения **второго** инвертора от сопротивления нагрузочного резистора определить, при каких сопротивлениях этого резистора на выходе инвертора появляется неопределенное состояние (сопротивление  $R_{1-x}$ ); состояние изменяется на противоположное ( $R_{x-0}$ ).

PARAMETERS:



4 Вычертить схему согласно варианту. На входы схемы подать сигналы от источников *VPULSE*. Нижний уровень напряжения каждого источника задать равным 0 В, а верхний 5 В. Длительность вершины импульса должна быть равна половине периода следования импульсов для каждого источника, т.е. каждый источник должен формировать меандр. Периоды следования импульсов источников должны быть заданы следующим образом. Например, если имеются источники *V1*, *V2*, *V3* и период следования импульсов для источника *V1* равен *PER*, то для источника *V2* период следования импульсов необходимо задать равным  $2PER$ , а для источника *V3* –  $4PER$ . В опциях моделирования выбрать анализ переходных процессов. Время моделирования задать равным периоду следования импульсов самого низкочастотного источника. По временной диаграмме работы схемы построить таблицу истинности. Убедиться в корректности результата.

5 Верхний уровень напряжения источника, подключенного к входу инвертора задать таким образом,

чтобы он попадал в зону неопределенности входных уровней инвертора (по результатам выполнения п. 2). Опции моделирования оставить без изменения. Получить временную диаграмму работы схемы. Сравнить результат с полученным в п. 4.

6 В схеме из п. 4 между выходом инвертора и землей включить резистор. Сопротивление резистора должно быть в диапазоне  $R_{X-0} \dots R_{1-X}$  (по результатам выполнения п. 3). Получить временную диаграмму работы схемы. Сравнить результат с полученным в п. 4. Задать сопротивление резистора  $< R_{X-0}$ . Получить временную диаграмму работы схемы. Сравнить результат с полученным в п. 4.

7 Подготовить отчет по работе, в котором должны быть приведены схемы с результатами моделирования и комментариями о ходе выполнения работы, и сделаны обоснованные выводы по результатам моделирования.

**Внимание!!!** При оформлении отчета выполнять копирование графической информации методами, изложенными в файле «Обработка результатов моделирования и копирование графической информации из программ пакета *OrCAD*». Отчеты, содержащие экранные копии окон со схемами и диаграммами («скриншоты») будут возвращены на доработку.

## Лабораторная работа № 17

### *Динамическое цифровое моделирование в пакете OrCAD*

**Цель работы:** Изучить основы динамического цифрового моделирования в САПР электронной аппаратуры *OrCAD*, научиться использовать шинные структуры и задавать внешние воздействия.

Варианты заданий находятся по ссылке «Варианты заданий к лабораторной работе № 17», а принципиальные схемы – по ссылкам «Принципиальные схемы цифровых устройств (часть 1)» и «Принципиальные схемы цифровых устройств (часть 2)». **Серию микросхем для каждой схемы взять из предыдущей лабораторной работы в соответствии со своим вариантом. В случае отсутствия требуемой микросхемы заданной серии в библиотеке OrCAD проконсультироваться с преподавателем.** Документация на используемые в части 2 лабораторной работы микросхемы представлена по ссылке «Документация на ИМС, используемые в части 2 лабораторной работы».

## ЧАСТЬ 1

### *Изучение основ динамического цифрового моделирования схем*

1.1 Подготовить задание на моделирование, т.е. временные диаграммы входных сигналов, которые позволят проверить и доказать работоспособность цифровой схемы, которую необходимо вычертить в графическом редакторе в соответствии с вариантом задания, и работу которой необходимо промоделировать.

1.2 Поместить нужное число копий генераторов цифровых динамических сигналов *STIM1*, *STIM4*, *STIM8*, *DigClock* на исследуемой схеме.

Источники постоянных сигналов низкого и высокого уровня *LO* и *HI* в текущей версии пакета *OrCAD* называются соответственно *\$D\_LO* и *\$D\_HI* и могут подключаться по команде *Place*→*GROUND* или клавишей *G*.

1.3 Пронумеровать цепи для всех генераторов внешних воздействий.

1.4 Задать вид анализа *Time Domain* и время моделирования.

1.5 Задать параметры источников сигналов и выполнить моделирование схемы.

1.6 Объяснить полученные результаты. Сделать обоснованные и доказательные выводы о работоспособности схемы и алгоритме её функционирования.

## ЧАСТЬ 2

### *Использование шин при подготовке чертежей и моделировании схем. Изучение способов описания внешних воздействий*

2.1 Вычертить в графическом редакторе цифровую схему из файла «Принципиальные схемы цифровых устройств (часть 2)» в соответствии с вариантом задания и и выполнить ее моделирование. Входные тестовые воздействия выбрать в соответствии с временной диаграммой или таблицей истинности, представленной в документации на тестируемую микросхему.

При подготовке схемы необходимо использовать входные и выходные шины данных, которые могут подключаться по команде *Place→BUS* или клавишей *B*. При построении графиков входных и выходных сигналов на рисунке необходимо поместить как информацию всей шины (например, шины *Q*), что позволяет видеть состояние шины в шестнадцатеричном виде, так и отдельных цепей (например, *Q0*, *Q1*, *Q2*, *Q3*).

2.2 Результаты моделирования сравнить с диаграммой или таблицей истинности, представленной в документации на тестируемую микросхему. Сделать выводы о правильности функционирования тестируемой ИМС.

3 Подготовить отчет по работе, в котором должны быть приведены схемы с результатами моделирования и комментариями о ходе выполнения работы, и сделаны обоснованные выводы по результатам моделирования. Также в отчете необходимо представить временную диаграмму или таблицу истинности из документации на микросхему, тестируемую в части 2 лабораторной работы, на основании которой делается вывод о правильности функционирования этой микросхемы.

**Внимание!!!** При оформлении отчета выполнять копирование графической информации методами, изложенными в файле «Обработка результатов моделирования и копирование графической информации из программ пакета *OrCAD*». Отчеты, содержащие экранные копии окон со схемами и диаграммами («скриншоты») будут возвращены на доработку.

## Лабораторная работа № 18

### *Моделирование и исследование схем подключения блоков АЦП и ЦАП*

**Цель работы:** Изучить методы проектирования, а также статического и динамического моделирования в САПР схем включения АЦП и ЦАП.

1 Перед выполнением задания необходимо изучить работу схем аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, при этом особое внимание уделить таким параметрам и характеристикам АЦП и ЦАП как разрядность устройств преобразования, опорное напряжение, время преобразования, тактирующие синхроимпульсы, выходные параметры схем. При необходимости обратиться к литературе и справочникам по схемотехнике.

2 Модели АЦП и ЦАП использовать из библиотек *BREAKOUT* или *DATA CONV*, библиотеку выбрать самостоятельно.

3 Подготовить модели анализа работы схемы АЦП и ЦАП.

3.1 На вход АЦП подать сигнал от источника напряжения **треугольной** формы. Для этого необходимо использовать источник *VPULSE*. Параметры источника задать следующим образом:  $V1 = 0$ ;  $V2 = 2A_{in}$ ;  $TR = TF = 1 / (2F_{in})$ ;  $PW = 0$ ;  $PER = 1 / F_{in}$ , где  $A_{in}$  и  $F_{in}$  – амплитуда и частота входного сигнала, взятые из таблицы с вариантами заданий. Выход АЦП подсоединить к информационной шине. Тактирующие импульсы рекомендуется задавать от источника цифровых сигналов *DigClock*. Частоту следования тактовых импульсов выбрать в 20–25 раз больше, чем  $F_{in}$ .

3.2 На вход блока ЦАП подать сигнал от информационной шины, между выходом ЦАП и землей необходимо включить резистор номиналом 1 кОм.

3.3 Выполнить анализ работы аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей при различных значениях опорного напряжения. Первоначальное значение опорного напряжения установить согласно индивидуальному заданию. Убедиться в корректной работе схем, сделать выводы.

4 Подготовить схему последовательного включения АЦП и ЦАП, цифровой выход АЦП подключить к входу ЦАП. На вход АЦП подать сигнал от источника синусоидального напряжения  $V_{SIN}$ , параметры которого приведены в таблице с вариантами заданий. К выходу ЦАП подключить резистор, второй вывод которого должен быть подключён к общей точке (земле).

5 Получить временные диаграммы моделирования последовательного подключения АЦП–ЦАП.

5.1 Выполнить анализ полученных временных диаграмм.

5.2 Оценить погрешность двойного преобразования.

5.3 Определить, как изменится (и изменится ли) выходное напряжение при уменьшении/увеличении опорного напряжения на входе ЦАП по отношению к опорному напряжению на АЦП.

6 Исследовать спектр сигнала на входе и выходе цепи последовательного подключения АЦП–ЦАП.

7 Рассчитать параметры фильтра, отфильтровывающего высокочастотные гармоники спектра сигнала на выходе ЦАП. Проверить расчёт, подключив к выходу ЦАП поведенческую модель фильтра. Убедиться в том, что высокочастотные гармоники отфильтровываются, при этом в исходный сигнал должны вноситься минимальные искажения.

9 Подключить к выходу ЦАП спроектированный фильтр, убедиться в правильности выполненного проектирования. Оценить искажения, которые вносятся цепью последовательного подключения АЦП–ЦАП и фильтром во входной сигнал.

10 Подготовить отчёт по работе, в котором должны быть приведены схемы с результатами моделирования и комментариями о ходе выполнения работы, и сделаны обоснованные выводы по результатам моделирования.

**Внимание!!!** При оформлении отчета выполнять копирование графической информации методами, изложенными в файле «Обработка результатов моделирования и копирование графической информации из программ пакета *OrCAD*». Отчеты, содержащие экранные копии окон со схемами и диаграммами («скриншоты») будут возвращены на доработку.

## Лабораторная работа № 19

### *Проектирование и моделирование схем комбинационной логики в пакете ActiveHDL*

**Цель работы:** Освоение процедур моделирования и разработки проектов схем комбинационной логики в пакете *ActiveHDL*.

#### 1 Общая постановка задачи

Пакет *ActiveHDL* фирмы *ALDEC* позволяет выполнить первоначальное описание проектируемого цифрового устройства как на языках *VHDL* или *Verilog*, так и в виде схемы, созданной в интерактивном редакторе схем из набора типовых элементов библиотеки пакета. Схема, подготовленная в редакторе, затем может быть транслирована в описание на языках *VHDL* или *Verilog*.

В лабораторной работе необходимо подготовить *VHDL*-описание устройства, представленного четырьмя логическими функциями. Функции заданы в виде таблицы истинности в соответствии с вариантом задания (см. документы «**Варианты заданий к лабораторной работе № 19 ...**»). Далее требуется задать

тестовые воздействия и выполнить моделирование устройства и получить временную диаграмму его работы и таблицу истинности (ТИ). Сравнить полученные результаты с заданной ТИ.

## 2 Порядок выполнения работы

1 Минимизировать любым известным методом и записать в аналитическом виде логические функции  $Y_0, Y_1, Y_2, Y_3$ , заданные таблицей истинности в соответствии с вариантом.

2 В пакете *ActiveHDL* создать новый проект и добавить в него новый *VHDL*-файл, как описано в документе «Создание проекта в *ActiveHDL* 8.1».

3 Описать логические функции, полученные в п. 1, на языке *VHDL* в созданном в п. 2 файле.

4 Выполнить компиляцию проекта, убедиться в отсутствии ошибок в проекте.

5 Задать тестовые воздействия для полученного в предыдущем пункте цифрового устройства и получить временную диаграмму его работы. Тестовые воздействия должны содержать все возможные комбинации входных сигналов  $X_0, X_1, X_2, X_3, X_4$ .

6 Используя заданные в предыдущем пункте тестовые воздействия сгенерировать таблицу истинности устройства.

7 Сравнить результаты, полученные в пунктах 5 и 6 с исходной таблицей истинности и сделать выводы.

8 Подготовить отчёт по работе, в котором должны быть приведена исходная ТИ, записанные в аналитической форме логические функции, *VHDL*-описание устройства, временные диаграммы, сгенерированная ТИ. Результаты выполнения работы должны содержать комментарии и обоснованные выводы.

**Внимание!!!** При оформлении отчета выполнять копирование временных диаграмм и сгенерированной таблицы истинности методами, изложенными в файле «Создание проекта в *ActiveHDL* 8.1». Отчеты, содержащие экранные копии окон с диаграммами и таблицами («скриншоты») будут возвращены на доработку.

## Лабораторная работа № 20

### *Проектирование, описание на языке VHDL и моделирование схем последовательной логики*

**Цель работы:** Изучить методы и приёмы проектирования и моделирования схем последовательной логики – триггеров, регистров, счётчиков – на языке *VHDL*.

#### **Описание на языке VHDL и моделирование триггеров**

1 В пакете *ActiveHDL* создать новый проект.

2 В отдельных *VHDL* файлах описать RS-, D-, T- и JK-триггеры. Полярность входных сигналов триггеров взять из таблицы в файле «Варианты заданий к лабораторной работе № 20 (часть 1)» в соответствии с вариантом задания.

3 Выполнить компиляцию проекта, убедиться в отсутствии ошибок в проекте.

4 Задать тестовые воздействия для каждого полученного в предыдущем пункте триггера и получить временные диаграммы их работы. Тестовые воздействия должны задаваться в соответствии с таблицами переходов триггеров. Таблицы переходов должны быть записаны в соответствии с заданной полярностью входных сигналов. Временные диаграммы сохранить в отдельных файлах.

5 Сравнить полученные временные диаграммы с таблицами переходов триггеров. Сделать выводы о правильности функционирования.

### **Описание на языке VHDL и моделирование счетчиков импульсов**

6 Для заданного модуля счета двоичного счетчика рассчитать разрядность выходной шины. Величину модуля счета, направление счета, а также полярность входных сигналов взять из файла «Варианты заданий к лабораторной работе № 20 (часть 2)» в соответствии с вариантом задания.

7 В отдельном VHDL файле описать двоичный счетчик с заданными характеристиками.

8 Задать тестовые воздействия для полученного в предыдущем пункте счетчика и получить временную диаграмму его работы. Тестовые воздействия должны задаваться в соответствии с указанной полярностью входных сигналов. Временная диаграмма должна демонстрировать поведение счетчика при сбросе и переполнении. Временную диаграмму сохранить в отдельном файле.

9 По полученной временной диаграмме сделать выводы о правильности функционирования счетчика.

### **Описание на языке VHDL и моделирование сдвиговых регистров**

10 В отдельном VHDL файле описать последовательно-параллельный сдвиговый регистр. Разрядность регистра, направление сдвига, а также полярность входных сигналов взять из файла «Варианты заданий к лабораторной работе № 20 (часть 3)» в соответствии с вариантом задания.

11 Задать тестовые воздействия для полученного в предыдущем пункте регистра и получить временную диаграмму его работы. Тестовые воздействия должны задаваться в соответствии с указанной полярностью входных сигналов. Временная диаграмма должна демонстрировать поведение регистра при сбросе и сдвиге произвольной последовательности импульсов на входе данных. Временную диаграмму сохранить в отдельном файле.

12 По полученной временной диаграмме сделать выводы о правильности функционирования регистра.

13 Подготовить отчет по работе, в котором должны быть приведены таблицы переходов триггеров, описание работы счетчика и регистра, VHDL-описания устройств, временные диаграммы. Результаты выполнения работы должны содержать комментарии и обоснованные выводы.

**Внимание!!!** При оформлении отчета выполнять копирование временных диаграмм методами, изложенными в файле «Создание проекта в *ActiveHDL* 8.1» к лабораторной работе № 19. Отчеты, содержащие экранные копии окон с диаграммами («скриншоты») будут возвращены на доработку.

## **Лабораторная работа № 21**

### ***Описание и моделирование регулярных (систолических) схем***

**Цель работы:** Изучить возможности языка VHDL и пакета *ActiveHDL* для описания и моделирования регулярных схем.

#### **Структурное описание на языке VHDL и моделирование счетчика импульсов**

1 В пакете *ActiveHDL* создать новый проект.

2 В папку ...\<<Workspace\_name>\<Design\_name>\src, где <Workspace\_name> – имя созданной рабочей области (Workspace), <Design\_name> – имя созданного проекта (Design), поместить файл с описанием T-триггера из предыдущей лабораторной работы. Подключить файл к проекту. Для этого вызвать пункт главного меню Design→Add Files to Design и в открывшемся окне выбрать скопированный файл. Изменить описание триггера таким образом, чтобы он тактировался задним фронтом тактового импульса, а сбрасывался

вался уровнем «1».

3 В отдельном VHDL файле описать двоичный суммирующий счетчик с последовательным переносом, как показано в примере. Модуль счета и разрядность счетчика принять такой же, как в лабораторной работе № 20.

4 Выполнить компиляцию проекта, убедиться в отсутствии ошибок в проекте.

5 Задать тестовые воздействия для полученного в предыдущем пункте счетчика и получить временную диаграмму его работы. Временная диаграмма должна демонстрировать поведение счетчика при сбросе и переполнении. Временную диаграмму сохранить в отдельном файле.

6 По полученной временной диаграмме сделать выводы о правильности функционирования счетчика.

### **Описание на языке VHDL и моделирование сдвигового регистра**

7 В папку ...\`<Workspace_name>`\\`<Design_name>`\src, где `<Workspace_name>` – имя созданной рабочей области (Workspace), `<Design_name>` – имя созданного проекта (Design), поместить файл с описанием D-триггера из предыдущей лабораторной работы. Подключить файл к проекту.

8 В отдельном VHDL файле описать последовательно-параллельный сдвиговый регистр, как показано в примере. Разрядность регистра и направление сдвига принять такими же, как в лабораторной работе № 20.

9 Задать тестовые воздействия для полученного в предыдущем пункте регистра и получить временную диаграмму его работы. Тестовые воздействия должны задаваться в соответствии с заданной для D-триггера полярностью входных сигналов. Временная диаграмма должна демонстрировать поведение регистра при сбросе и сдвиге произвольной последовательности импульсов на входе данных. Временную диаграмму сохранить в отдельном файле.

10 По полученной временной диаграмме сделать выводы о правильности функционирования регистра.

11 Подготовить отчет по работе, в котором должны быть схемы разрабатываемых счетчика и регистра, описание их работы, VHDL-описания устройств, временные диаграммы. Результаты выполнения работы должны содержать комментарии и обоснованные выводы.

**Внимание!!!** При оформлении отчета выполнять копирование временных диаграмм методами, изложенными в файле «Создание проекта в *ActiveHDL* 8.1» к лабораторной работе № 19. Отчеты, содержащие экранные копии окон с диаграммами («скриншоты») будут возвращены на доработку.

## **Лабораторная работа № 22**

### ***Проектирование, описание на языке VHDL и моделирование конечных автоматов***

**Цель работы:** Изучить методы и приёмы проектирования и моделирования цифровых конечных автоматов на языке VHDL.

#### **1 Общая постановка задачи**

1.1 В лабораторной работе необходимо разработать поведенческую VHDL-модель конечного автомата Мили. Также необходимо подготовить тестирующие воздействия, выполнить моделирование, получить временную диаграмму работы автомата, проанализировать результаты, сделать обоснованные выводы по работе.

Интерфейс проектируемого автомата должен включать в себя следующие порты:

– тактовый вход, по переднему фронту сигнала на котором происходит смена состояний автомата;

– вход установки в начальное состояние (вход сброса). При наличии высокого уровня на этом входе автомат всегда находится в начальном состоянии. В качестве начального принимается состояние, записанное на пересечении первого столбца и первой строки таблицы состояний автомата в соответствии с вариантом задания;

– вход данных – вектор заданной по варианту ширины (разрядности). Значение сигнала на этом входе определяет следующие внутреннее и выходное состояния автомата;

– выход данных – вектор, выводящий выходное состояние автомата.

Автомат может находиться в одном из четырех внутренних состояний  $a_i$ . Разрешенный набор комбинаций входного сигнала представлен тремя значениями  $z_j$ . Все остальные входные значения являются запрещенными и их появление должно приводить к переходу автомата в начальное состояние. Выходной набор представлен четырьмя значениями  $w_0-w_3$ .

Заданные по варианту входные и выходные состояния автомата объявить в виде констант типа STD\_LOGIC\_VECTOR. Для хранения текущего внутреннего состояния автомата объявить переменную перечислимого типа. В качестве значений типа использовать имена внутренних состояний в соответствии с вариантом. Имена входного и выходного портов, а также констант, задать в соответствии с вариантом.

Переходы между состояниями описать с помощью селектора CASE.

## 2 Теоретические сведения к работе

Конечный автомат Мили (в англоязычной литературе *state machine* – машина состояний) представляет собой устройство, имеющее конечное число возможных состояний и функционирующее в дискретном времени. Текущее внутреннее и выходное состояния автомата являются функциями предыдущего внутреннего состояния и входного сигнала:

$$a_n = f(a_{n-1}, z_n),$$

$$w_n = g(a_{n-1}, z_n),$$

где  $a_n$  – текущее внутреннее состояние автомата;  $a_{n-1}$  – предыдущее внутреннее состояние автомата;  $z_n$  – текущее значение входного сигнала;  $w_n$  – текущее выходное состояние автомата (значение выходного сигнала).

Автомат может быть задан в виде графа переходов или таблицы состояний. Пример таблицы состояний приведен ниже.

Таблица 1 – Таблица состояний автомата

Входные сигналы	Состояния			
	a1	a2	a3	a4
z1	a2/w1	a2/w1	a1/w2	a3/w5
z2	a4/w5	a3/w3	a4/w4	a2/w1
z3	a3/w2	a3/w3	a1/w4	a4/w4

Столбцы таблицы определяют предыдущие внутренние состояния автомата (в нашем случае это состояния  $a_1, a_2, a_3$  и  $a_4$ ). Стоки определяют текущие значения входного сигнала (значения  $z_1, z_2$  и  $z_3$ ). На пересечениях соответствующих столбцов и строк указывается, какое внутреннее и выходное состояния должен принять автомат в текущем такте. Например, если в предыдущем такте автомат имел внутреннее состояние  $a_1$ , а на входе в данный момент присутствует значение  $z_1$ , то автомат примет внутреннее состояние  $a_2$ , а на его выходе появится сигнал  $w_1$ . Если в следующем такте входное значение станет равным  $z_3$ , то автомат примет внутреннее состояние  $a_3$ , а на выходе появится значение  $w_3$ , и т.д.

Состояние, указанное на пересечении первой строки ( $z_1$ ) и первого столбца ( $a_1$ ) следует принять в качестве начального. В это состояние автомат переходит при сбросе или при присутствии на входе запрещенной комбинации. Таким образом, для данного примера начальным состоянием автомата является состояние  $a_2$ , при этом на выходе присутствует значение  $w_1$ .

## Пример поведенческого описания автомата на языке VHDL

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.all;

-----
-----
-----
--описание интерфейса объекта
entity state_machine is
    port (
        clk      : in  STD_LOGIC;           --ТАКТОВЫЙ ВХОД
        rst      : in  STD_LOGIC;           --ВХОД сброса
        input    : in  STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0); --ВХОДНОЙ СИГНАЛ АВТОМА-
та
        output   : out STD_LOGIC_VECTOR(3 downto 0) --ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ АВТО-
мата
    );
end state_machine;

-----
-----
-----
--описание архитектуры объекта
architecture state_machine of state_machine is

--ВХОДНЫЕ СОСТОЯНИЯ АВТОМАТА
constant z1 : std_logic_vector (3 downto 0) := "0010"; --ВХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ
z1
constant z2 : std_logic_vector (3 downto 0) := "1010"; --ВХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ
z2
constant z3 : std_logic_vector (3 downto 0) := "0101"; --ВХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ
z3

--ВЫХОДНЫЕ СОСТОЯНИЯ АВТОМАТА
constant w1 : std_logic_vector (3 downto 0) := "0000"; --ВЫХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ
w1
constant w2 : std_logic_vector (3 downto 0) := "1000"; --ВЫХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ
w2
constant w3 : std_logic_vector (3 downto 0) := "1001"; --ВЫХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ
w3
constant w4 : std_logic_vector (3 downto 0) := "1111"; --ВЫХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ
w4
constant w5 : std_logic_vector (3 downto 0) := "0010"; --ВЫХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ
w5

--перечислимый тип, определяющий внутренние состояния автомата
type state_type is (
    a1,      --состояние a1
    a2,      --состояние a2
```

```

        a3,      --состояние a3
        a4);    --состояние a4

signal state : state_type := a2; -- сигнал, определяющий текущее
                                -- внутреннее состояние автомата (начальное
состояние a2)

signal output_i : std_logic_vector (3 downto 0) := w1; -- сигнал, определяю-
щий текущее значение
                                                    -- выходного сигнала
(начальное значение w1)
begin

    -- enter your statements here --
    --процесс запускается при изменении сигналов clk или rst
process (clk, rst)
begin
    if (rst = '1') then
        --если вход сброса активен, установить автомат в начальное со-
состояние (a2/w1)
        state    <= a2;
        output_i <= w1;
    elsif (clk'event and clk = '1') then
        --процесс запущен по приходу переднего фронта тактового импульса
        --+++++
        --выбор действия по внутреннему состоянию
        case state is
            --внутреннее состояние a1
            when a1 =>
                =====
                --выбор действия по входному состоянию
                case input is
                    --входное состояние z1
                    when z1 =>
                        state    <= a2;
                        output_i <= w1;
                    --входное состояние z2
                    when z2 =>
                        state    <= a4;
                        output_i <= w5;
                    --входное состояние z3
                    when z3 =>
                        state    <= a3;
                        output_i <= w2;
                    --любое другое входное состояние
                    when others =>
                        --переход в начальное состояние
                        state    <= a2;
                        output_i <= w1;
                end case; --input
                =====

```

```

--внутреннее состояние a2
when a2 =>
=====
--выбор действия по входному состоянию
case input is
  --входное состояние z1
  when z1 =>
    state    <= a2;
    output_i <= w1;
  --входное состояние z2
  when z2 =>
    state    <= a3;
    output_i <= w3;
  --входное состояние z3
  when z3 =>
    state    <= a3;
    output_i <= w3;
  --любое другое входное состояние
  when others =>
    --переход в начальное состояние
    state    <= a2;
    output_i <= w1;
end case; --input
=====

```

```

--внутреннее состояние a3
when a3 =>
=====
--выбор действия по входному состоянию
case input is
  --входное состояние z1
  when z1 =>
    state    <= a1;
    output_i <= w2;
  --входное состояние z2
  when z2 =>
    state    <= a4;
    output_i <= w4;
  --входное состояние z3
  when z3 =>
    state    <= a1;
    output_i <= w4;
  --любое другое входное состояние
  when others =>
    --переход в начальное состояние
    state    <= a2;
    output_i <= w1;
end case; --input
=====

```

```

--внутреннее состояние a4
when a4 =>
    =====
    --выбор действия по входному состоянию
    case input is
        --входное состояние z1
        when z1 =>
            state    <= a1;
            output_i <= w4;
        --входное состояние z2
        when z2 =>
            state    <= a3;
            output_i <= w5;
        --входное состояние z3
        when z3 =>
            state    <= a3;
            output_i <= w5;
        --любое другое входное состояние
        when others =>
            --переход в начальное состояние
            state    <= a2;
            output_i <= w1;
    end case; --input
    =====
    --любое другое внутреннее состояние
    when others =>
        --переход в начальное состояние
        state    <= a2;
        output_i <= w1;
    end case; --state
    -----
end if; --rst = '1'
end process;
output <= output_i;
end state_machine;

```