

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Курганский государственный университет

Кафедра автоматизации производственных процессов

## **ВВЕДЕНИЕ В МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Методические указания  
к выполнению контрольной работы  
для студентов заочной формы обучения  
направлений 15.03.04, 27.03.04

Курган 2018

Кафедра автоматизации производственных процессов.

Дисциплина: «Введение в моделирование технических систем».

Составил: ст. преподаватель Е.М. Кузнецова.

Утверждены на заседании кафедры «31» августа 2017 г.

Рекомендованы методическим советом университета «12» декабря 2016 г.

## Введение

Моделирование технических объектов и систем проводится для того, чтобы определить свойства и характеристики проектируемых систем еще до их изготовления и при необходимости скорректировать, уточнить их структуру и параметры. Это позволяет получить проект работоспособной системы, которую не придется существенно дорабатывать уже после ее изготовления. Таким образом, моделирование сокращает процесс проектирования и реализации систем и объектов.

### 1 Основные принципы работы программы VisSim

Программа VisSim предназначена для построения, исследования и оптимизации виртуальных моделей физических и технических объектов, в том числе и систем управления. Используемое окно VisSim разделено на две части (рисунок 1). Левая область окна отображает дерево блок-схемы или модели, т.е. является иерархическим представлением последней. Наверху иерархии имя файла рабочей блок-схемы.

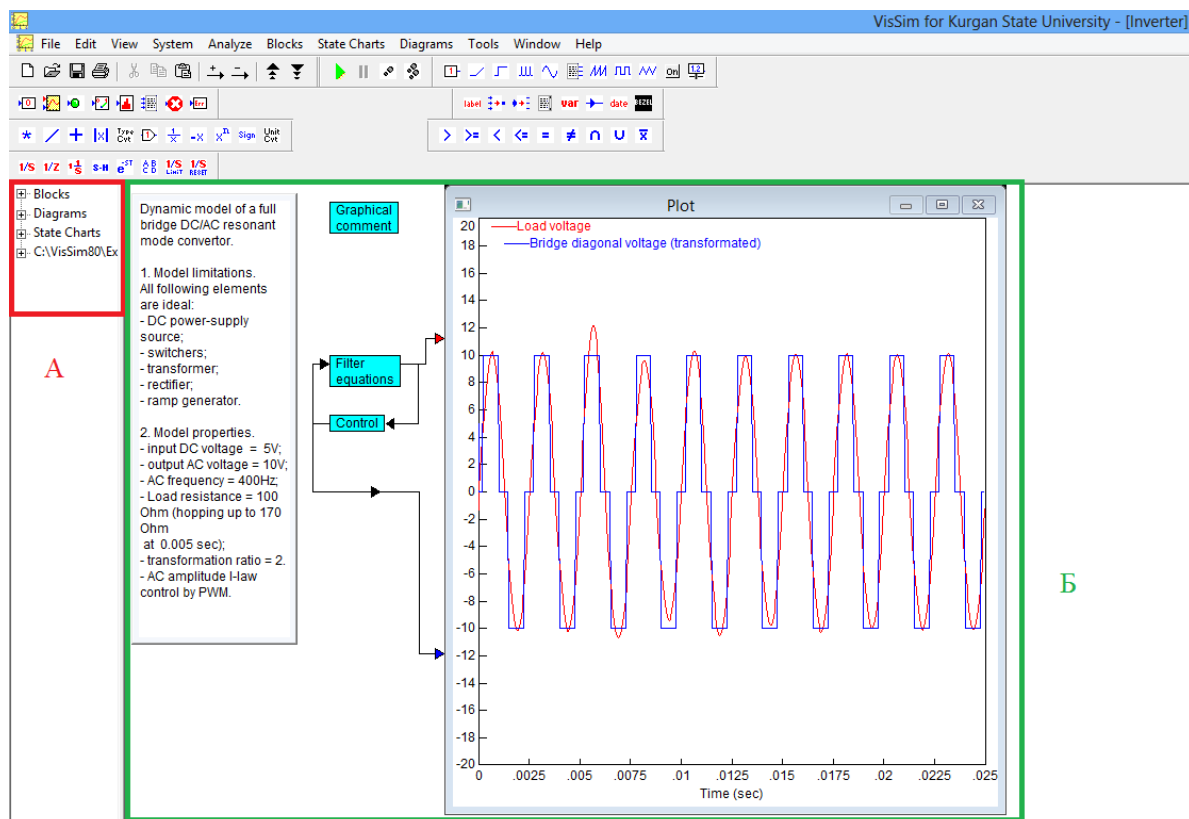


Рисунок 1 – Окно системы Vissim

*A – область дерева структуры блок-схемы (модели), B – окно модели*

Интерфейс программы VisSim создан таким образом, что большинство операций может выполняться с помощью панелей инструментов. Однако полный доступ ко всем операциям осуществляется из меню (рисунок 2).



Рисунок 2 – строка меню

Для построения моделей в системе VisSim используются блоки, которые хранятся в библиотеке блоков и могут браться из нее, переноситься в окно модели и соединяться друг с другом.

Библиотека блоков, представленная в позиции *Blocks* (Блоки) меню и инструментальными панелями, содержит следующие «тома» (рисунок 3).

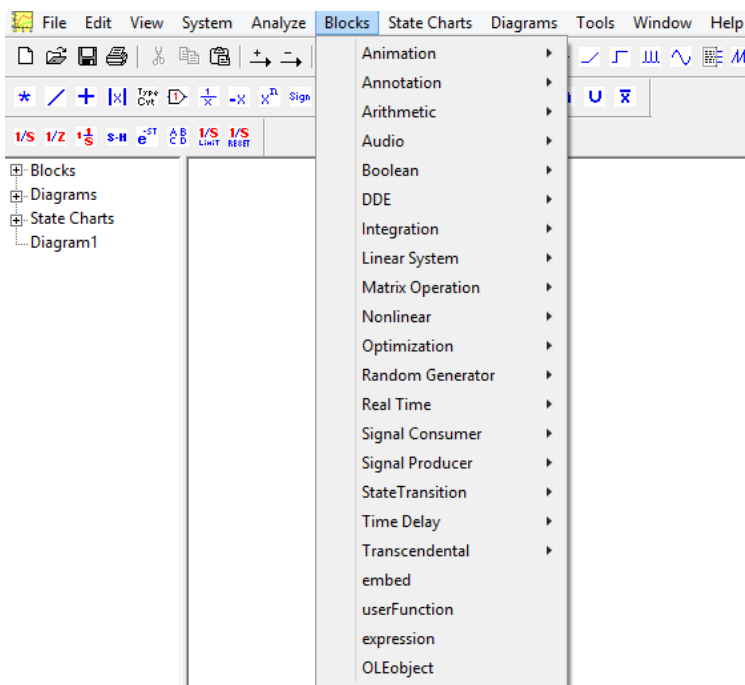


Рисунок 3 – Библиотека блоков

Часто использующиеся блоки вынесены на панель инструментов (рисунок 4). Их можно подключать или отключать правой кнопкой мыши.

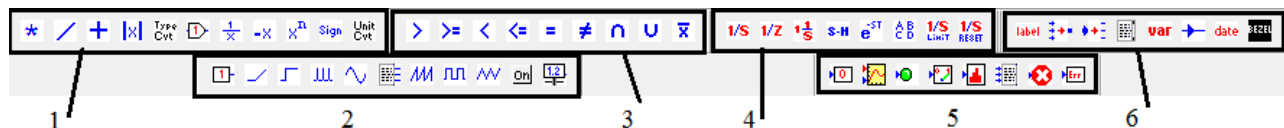


Рисунок 4 – Панели инструментов

1 – *Arithmetic Blocks*, 2 – *Signal Producer Blocks*, 3 – *Boolean Blocks*, 4 – *Dynamic Blocks*, 5 – *Signal Consumer*, 6 - *Annotation*

Некоторые блоки имеют несколько входов и (или) выходов. Они обозначаются как  $x_1, x_2, \dots, x_n$  для входов и  $y_1, y_2, \dots, y_n$  для выходов. Входы и выходы обозначаются цветными треугольниками, острие которых указывает на направление подачи сигнала (для входных блоков внутрь блока, для выходных – из блока).

## **2 Принципы построения моделей в среде VisSim**

Исходными данными для построения модели в VisSim являются структурно-функциональная схема моделируемой системы, процесса или объекта и описывающие их дифференциально-алгебраические уравнения. Вместо таких уравнений могут быть заданы операторы или функции, характеризующие отдельные элементы моделируемой системы, например, передаточные функции для линейных элементов и статические характеристики для нелинейных элементов.

Модели систем и объектов в программе VisSim строятся из отдельных элементов – блоков. Виртуальные блоки VisSim могут иметь или вход, на который может быть подан выходной сигнал другого блока, или выход, виртуальный сигнал с которого может быть подан на вход другого блока, могут иметь и вход, и выход одновременно. Взаимодействие между блоками отображается линиями связи, указывающими направление передачи воздействий (сигналов) от одного блока к другому.

Взаимодействие между блоками моделируется сигналами – функциями времени, передаваемыми между блоками по линиям связи. Сигналы в модели могут быть измерены с помощью виртуальных измерительных устройств или рассмотрены и изучены с помощью виртуального осциллографа.

### **2.1 Создание новой модели**

Создание новой модели (диаграммы или блок-схемы) начинается с исполнения команды *New* (Новая) в позиции *File* (Файл) меню или с активизации кнопки *New* в панели инструментов.

Нужные блоки модели выделяются на панели инструментов мышью путем указания на нужную кнопку курсором мыши и фиксации выбора

коротким щелчком левой клавиши мыши. Также нужный блок можно выбрать и из меню *Blocks*.

Введя нужные блоки, их можно соединить опять-таки с помощью мыши. Возможны соединения без построения всей линии достаточно пометить меткой начало соединительной линии и ее конец. Это упрощает построение сложных графических диаграмм.

## 2.2 Основные блоки VisSim

Блоки VisSim можно условно разделить на три основных категории и одну дополнительную:

- Блоки, имеющие только выход: генераторы.
- Блоки, имеющие вход и выход: преобразователи.
- Блоки, имеющие только вход: индикаторы.
- Блоки без входов и выходов: надписи, комментарии и др.

### Генераторы

Генераторы вырабатывают изменяющиеся во времени или постоянные сигналы.

Примерами таких блоков в VisSim являются блоки (рисунок 5):

- *step* (ступенька) – генератор ступенчатой единичной функции  $1_0(t)$ ;
- *const* – генератор постоянного сигнала, величина которого не меняется в процессе работы модели;

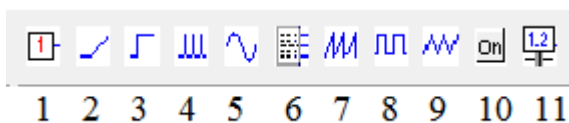


Рисунок 5 – Блоки – генераторы сигнала (Signal Producer Blocks)

1 – *const*; 2 – *ramp*; 3 – *step*; 4 – *pulse*; 5 – *sinusoid*; 6 – *import*; 7 – *saw*; 8 – *square*; 9 – *triangle*; 10 – *button*; 11 – *slider*

### Преобразователи

Преобразователи это блоки, имеющие входы и выходы (рисунок 6, 7).

Блоки-преобразователи способны воспринимать воздействия от других блоков, преобразовывать их в соответствии с определенными уравнениями

или правилами и выдавать преобразованный сигнал (отклик, реакцию блока) на выход.

Важнейшие блоки для моделирования линейных систем:

- блок *transferFunction* – передаточная функция. Этот блок позволяет создавать модели как простых, так и очень сложных элементов линейных систем и систем в целом;
- *integrator* – блок интегратора, осуществляющий интегрирование входного сигнала по времени;
- *summingJunction* – сумматор двух и более сигналов.
- *gain* – усилитель.

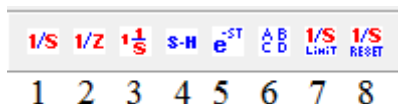


Рисунок 6 – Блоки-преобразователи (Dynamic Blocks)

1 – *integrator*; 2 – *unit delay*; 3 – *transferFunction*; 4 – *sample hold*; 5 – *continuous delay*; 6 – *state space*; 7 – *limited integrator*; 8 – *resettable integrator*

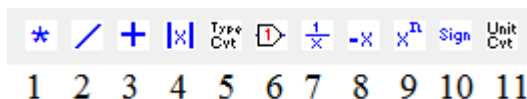


Рисунок 7 – Блоки преобразований (Arithmetic Blocks)

1 – *multiply*; 2 – *divide*; 3 – *summingJunction*; 4 – *abs*; 5 – *convert*; 6 – *gain*; 7 – *inverse*; 8 – *negate*; 9 – *power*; 10 – *sign*; 11 – *unit conversion*

## Индикаторы

Индикаторы это блоки, имеющие только вход.

Индикаторы программы VisSim предназначены для отображения сигналов в форме удобной и привычной для исследователя (рисунок 4).



Рисунок 8 – Блоки индикаторы (Signal Consumer Blocks)

1 – *display*; 2 – *2D plot*; 3 – *light*; 4 – *meter*; 5 – *histogram*; 6 – *export*; 7 – *stop*; 8 – *error*

Важнейшими индикаторами являются блоки:

- осциллограф – *plot*;
- цифровой индикатор – *display*.

*Виртуальный осциллограф (plot)* представляет собой окно, похожее на экран осциллографа, в котором изображается зависимость наблюдаемых сигналов от времени. На боковой стороне осциллографа помещены условные изображения входов, к которым могут быть подключены выходы других блоков диаграммы для наблюдения поведения их сигналов в зависимости от времени.

*Цифровой индикатор (display)* – выводит, показывает в цифровом виде значение сигнала на выходе того блока, к которому он подключен. Этот прибор используется для измерения постоянных величин.

### **Надписи и комментарии**

Надписи это блоки без входов и выходов (рисунок 9).

Эти блоки позволяют создавать на рабочем пространстве диаграммы VisSim текстовые области, которые помогают понять смысл диаграммы и содержат сведения о том, кто, когда и какую диаграмму создал. Хорошим тоном считается размещать надписи (*label*) и комментарии (*comment*) при создании модели. Удобной альтернативой для передачи сигналов может являться возможность использования определяемых пользователем переменных (*variable*).



Рисунок 9 – Блоки надписи (Annotation Blocks)

*1 – label; 2 – scalar to vector; 3 – vector to scalar; 4 – comment; 5 – variable; 6 – wire positioner; 7 – date; 8 – bezel*

## **2.3 Вставка, настройки, соединение блоков**

### **Вставка блоков**

Установить блок на рабочее поле можно двумя способами:

- Все блоки можно найти в одноименном меню. Оно систематизировано по категориям в группы, названия которых отмечены черным треугольником.



При выборе меню Блоки, появляется список групп. Выбор желаемой, сопровождается появлением подменю со списком соответствующих блоков. Необходимо отметить желаемый блок. Он прицепится к указателю мышки в виде рамки. Затем его нужно переместить в желаемое место блок-схемы и повторно щелкнуть мышкой (блок будет установлен).

- Нажать на кнопку необходимого блока в инструментальной панели. Блок прицепится к указателю мышки в виде рамки. Переместить его в желаемое место рабочей области и повторно щелкнуть мышкой (блок будет установлен).

### **Соединение блоков – обзор**

Соединение блоков проводниками указывает программе в какой последовательности и какому блоку передать сигналы для обработки в течение симуляции модели. Сигналы – это просто данные (значения координат модели). К входным сигналам ( $x_n$ ) относятся те, что поступают на входы блоков; выходные сигналы ( $y_n$ ) присутствуют на их выходах.

В VisSim имеется два типа проводов:

- простой проводник
- шинный проводник

Простой проводник (*FlexWire*) – это тонкий провод, который позволяет передать только один сигнал (координату) между блоками. Шинный проводник, на экране более толстый он содержит множество простых проводников и позволяет передавать совокупность сигналов. Шинные проводники используются при выполнении векторных или матричных операций, или же в целях повышения наглядности проекта (не загромождения блок-схемы на верхнем уровне).

Собрать одиночные проводники в шину и вывести их из нее можно при помощи парных блоков *scalarToVec* и *vecToScalar* соответственно.

### **Правила соединения блоков проводниками**

При соединении блоков действуют следующие правила:

- Соединить можно только пару – вход и выход.

- К любому входу можно подключить только один проводник (сигнал).
- К любому выходу можно подключить множество входов (проводников).

- VisSim автоматически располагает провода по кратчайшему пути.

Для соединения блоков нужно выполнить следующие действия:

- 1) Подведите указатель мыши к выводу блока (желательно к выходу), который хотите соединить с другим выводом. Вид указателя должен смениться на стрелку ↑.
- 2) Удерживая кнопку мыши, перетащите указатель с проводником к выводу блока назначения.
- 3) Находясь в области подключаемого вывода, отпустите клавишу мыши.
- 4) В момент выполнения операции, когда указатель перемещается, VisSim генерирует мерцающую линию, которая является проводником. VisSim рисует проводники только под прямыми углами, поэтому проводник не повторяет путь курсора.

Для изменения цветовой раскраски всех проводников блок-схемы выполните действия:

- 1) Выберите команду меню Вид > Цвет.
- 2) В диалоговом окне "Выбор цвета" в выпадающем меню "Линии связи" нажмите кнопку СТРЕЛКА ВНИЗ.
- 3) Выберите желаемый цвет.
- 4) Нажмите на кнопку ОК или клавишу ENTER.

Для удаления проводника необходимо отделить его от входа блока, к которому он подключен:

### **Копирование блоков в другое приложение**

Для копирования рисунка блок-схемы в другие Windows-приложения можно использовать команду меню Правка > Копировать. Элементы окна, меню, полосы прокрутки, инструментальные панели и строка статуса копироваться в Буфер обмена не будут.


## **Зеркальное отображение блоков**

Иногда, более логично изображение блока, у которого поменяны входы с выходами (блок развернут на  $180^\circ$  по горизонтали). Например, это необходимо для отображения цепей обратной связи. VisSim предоставляет подобную возможность, при этом автоматически перерисовывает проводники.

Для обмена положений входов с выходами (зеркального отображения блока) выполните действия:

- 1) Выделите блок или группу блоков.
- 2) Выберите команду меню Правка > Развернуть блок. Либо нажмите на клавиатуре клавиши CTRL и стрелку влево.
- 3) Щелкните кнопкой мыши на пустом месте рабочего поля для сброса выделения.

## **2.4 Понятие о принципах функционирования программы VisSim**

Для запуска процесса моделирования следует щелкнуть по кнопке с зеленым треугольником  «Пуск».

Получив эту команду, программа начинает анализировать то, как соединены блоки, на основе этого анализа составляет дифференциально-алгебраические уравнения, описывающие модель и решает их. Полученные результаты, как функции модельного времени, придают значениям входных и выходных сигналов блоков.

Выходные сигналы любого блока при желании можно наблюдать на экране виртуального осциллографа или измерять виртуальным цифровым индикатором. В результате решения можно получить зависимости выходных сигналов от времени.

## **2.5 Установка свойств моделирования**

### **Установка диапазона симуляции**

Для установки диапазона симуляции в VisSim необходимо задать ряд параметров и выбрать необходимый режим симуляции:

- начальное время симуляции движения;

- конечное время симуляции движения;
- размер шага симуляции, или частоту;
- режим расчетов в реальном времени или свободный (с максимальной производительностью компьютера);
- разовый запуск или режим автоматического перезапуска модели (с или без установки начальных условий).

Для установки диапазона симуляции выполните действия:

- 1) Выберите команду меню Симуляция (*System*) > Настройки симуляции (*System Properties*).
- 2) В диалоговом окне «Настройки симуляции» выберите вкладку «Диапазон» (*Range*).
- 3) Введите необходимые данные и установите требуемые опции.
- 4) Нажмите на кнопку ОК или клавишу ENTER.

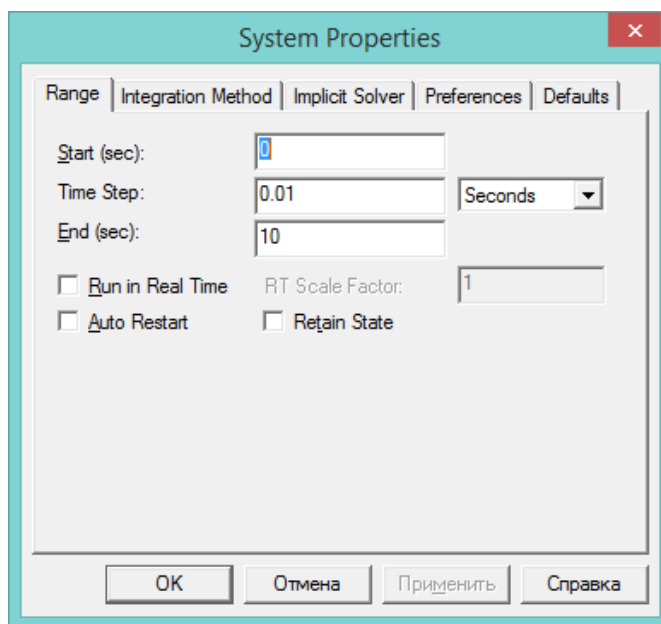


Рисунок 10 – Окно настройки симуляции

### **Назначение метода интегрирования**

Назначение метода интегрирования означает, что для расчетов ко всем интеграторам блок-схемы (1/S) подключается указанный алгоритм. Если выбран адаптивный алгоритм, то дополнительно необходимо определить минимальный размер шага, допуск ошибки и количество возможных итераций.

VisSim имеет семь алгоритмов интегрирования различной точности для численного решения (интегрирования) дифференциальных уравнений: Эйлера, Трапецеидальный, Рунге-Кутта 2-ого порядка, Рунге-Кутта 4-ого порядка, Адаптивный Рунге-Кутта 5-ого порядка, Адаптивный Булирша-Стоера и Обратный Эйлера (жесткий).

Хорошее правило выбора метода интегрирования состоит в том, чтобы использовать наименее сложный алгоритм, который обеспечивает устойчивые и правильные результаты.

### Установки на вкладке «Методы интегрирования»

Для назначения метода интегрирования выполните действия:

- 1) Выберите команду меню Симуляция > Настройки симуляции.
- 2) В диалоговом окне «Настройки симуляции» выберите вкладку «Методы интегрирования» (*Integration Method*).
- 3) Выберите метод и (при необходимости) задайте параметры.
- 4) Нажмите на кнопку ОК или клавишу ENTER.

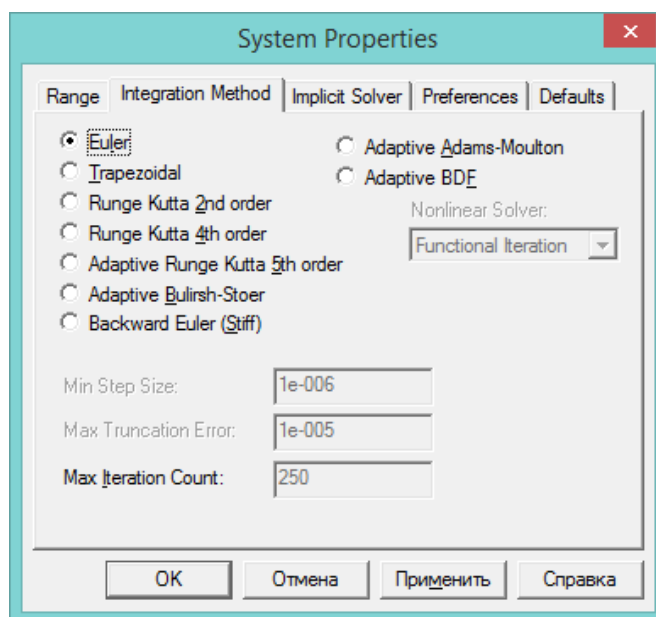


Рисунок 11 – Окно выбора метода интегрирования

### Настройки симуляции по умолчанию

Вы можете определить назначаемые по умолчанию настройки симуляции при запуске VisSim-а или при создании новой блок-схемы. К ним

относятся: метод интегрирования, диапазон, размер шага симуляции и максимальное число точек в следах лучей приборов.

Для задания значений по умолчанию в настройках симуляции выполните действия:

- 1) Выберите команду меню Симуляция > Настройки симуляции.
- 2) В диалоговом окне «Настройки симуляции» выберите вкладку «Предустановки» (*Default*).
- 3) Назначьте значения по умолчанию.
- 4) Нажмите на кнопку ОК или клавишу ENTER.

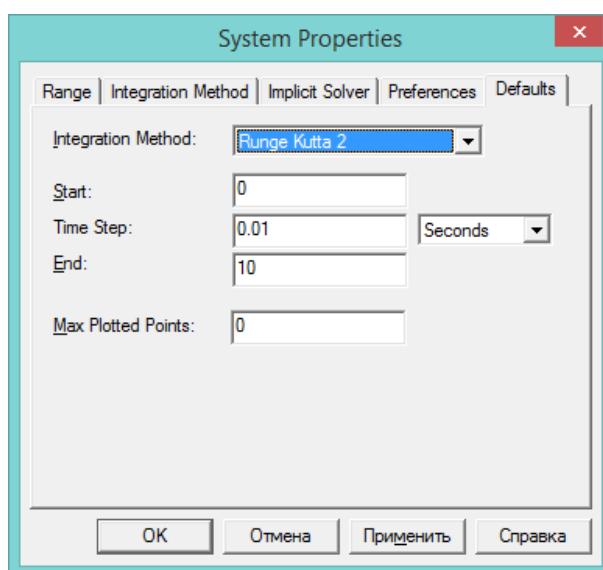


Рисунок 12 – Окно настроек симуляции по умолчанию

### 3 Задание и методические указания

#### 3.1 Цель работы

Исследование и оптимизация системы автоматического регулирования частоты вращения вала двигателя постоянного тока.

#### 3.2 Задачи работы

1. Построение структурной схемы (модели САР).
2. Построение частотных характеристик САР.
3. Анализ устойчивости и предварительная коррекция САР.
4. Оценка качества регулирования.

### 3.3 Исходные данные

$N$  – номер варианта (определяется по последней цифре зачетной книжки студента)

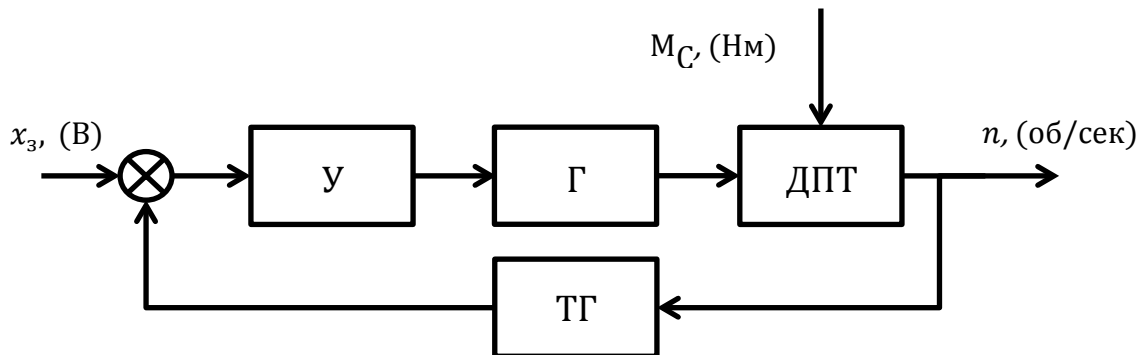


Рисунок 13 – Функциональная схема системы

У – усилитель; Г – генератор постоянного тока; Д – двигатель постоянного тока; ТГ – тахогенератор;  $M_c$  – момент сопротивления на валу двигателя;  $n$  – частота вращения вала двигателя.

*Параметры элементов*

У (усилитель) - усилительное, пропорциональное звено:

$$k_y = 10 + N/2 ; W_y(p) = k_y ;$$

Г (генератор) – аperiodическое звено:

$$k_r = 0,5 \cdot (10 + N/2) ; T_r = 0,01 \cdot (12 + N/2), \text{ сек.}$$

$$W_r(p) = \frac{k_r}{T_r p + 1}$$

Д – двигатель постоянного тока. Модель двигателя по управлению – аperiodическое звено второго порядка:

$$k_{дв} = 0,2 \cdot (13 + N/2) [\text{об}/(\text{сек} \cdot \text{В})]; T_{я} = 0,01 \cdot (8 + 0,1 N) \text{ сек};$$

$$T_m = 0,1(4 + 0,2 N) \text{ сек.}$$

$$W_{дв}(p) = \frac{k_{дв}}{T_m T_{я} p^2 + T_m p + 1}$$

Д – двигатель по возмущению, моменту нагрузки, имеет параметры и передаточную функцию:

$$k_{дв} = 0,05(14 + N/2) [\text{об}/(\text{сек} \cdot \text{Н} \cdot \text{м})];$$

$$W_{дв}(p) = \frac{-k_{дв}(T_{я} p + 1)}{T_m T_{я} p^2 + T_m p + 1}$$

ТГ – пропорциональное звено:

$$k_{\text{ТГ}} = 0,01 \cdot (1 + 0,05 N) [\text{В} \cdot \text{сек} / \text{об}];$$

$$W_{\text{ТГ}}(p) = k_{\text{ТГ}}$$

### 3.4 Порядок выполнения работы

1) Построить структурную схему САР

Поэлементно заменить функциональные элементы структурными. Обратить внимание на то, что ДПТ заменяется не одним, а тремя элементами:

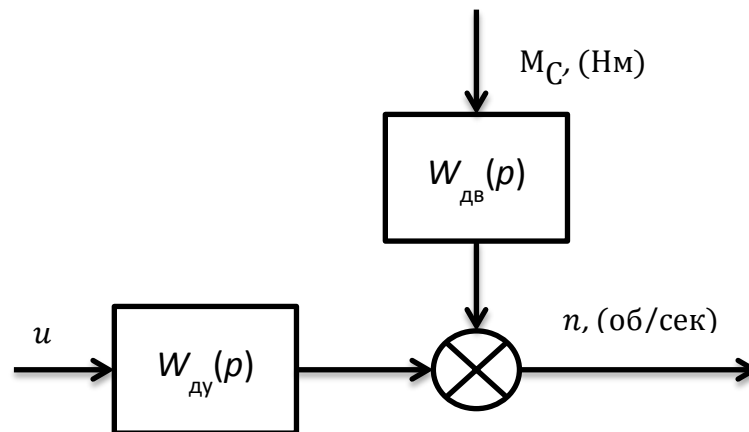


Рисунок 14 – Структурная схема (модель) двигателя постоянного тока.

2) Определить  $W(p)$  – передаточную функцию разомкнутого контура.

*Последовательное соединение* (рисунок 15) – выходная величина предшествующего звена подается на вход последующего.

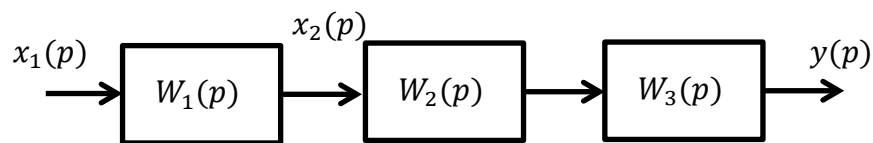


Рисунок 15 – структурная схема последовательного соединения

$$W = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3$$

*Параллельное соединение* (рисунок 16) – на вход каждого звена подается один и тот же сигнал, а выходные сигналы складываются.



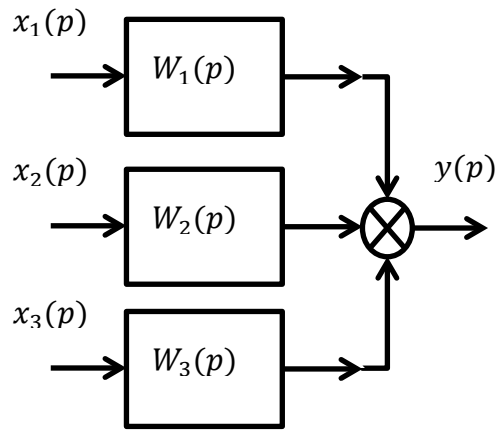


Рисунок 16 – структурная схема параллельного соединения

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$

*Встречно-параллельное соединение* (рисунок 17) – звено охвачено положительной или отрицательной обратной связью. Участок цепи, по которому сигнал идет в противоположном направлении по отношению к системе в целом (то есть с выхода на вход) называется *цепью обратной связи* с передаточной функцией  $W_{oc}$ .

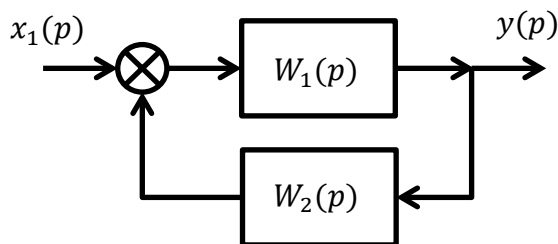


Рисунок 17 – структурная схема встречно-параллельного соединения

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_2(p)W_1(p)}$$

3) Оценить устойчивость замкнутой САР по критерию Найквиста.

Построить ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура:

$$L(\omega) = 20 \lg(|W(\omega)|), \text{ [дБ]}$$

$$\varphi(\omega) = \arg(W(j\omega)), \text{ [градусы]}$$

Оценить устойчивость САР. У устойчивой системы частота среза  $\omega_{cp}$  (т.е. частота, на которой ЛАЧХ пересекает ось абсцисс) должна быть меньше частоты  $\omega_{\pi}$  (частота, на которой ЛФЧХ равна  $-180^\circ$ ).

5) Осуществить предварительную коррекцию САР:

а) перемещая ЛАЧХ вверх и вниз, добиться:

- запаса  $\gamma$  по фазе  $35^\circ < \gamma < 65^\circ$
- желательно запас  $L$  по амплитуде иметь  $20\text{дБ} > L > 12\text{дБ}$
- при выполнении вышеназванных условий, желательно иметь коэффициент усиления разомкнутого контура статической САР:  $20\text{дБ} < L(0) < 40\text{дБ}$ . Если это не удастся, придется ввести ПИ-регулятор и вновь построить ЛАЧХ и ЛФЧХ.

б) Оценить качество регулирования САР.

Определить передаточные функции:

- $\Phi_3(p)$  – САР по заданию;
- $\Phi_{\text{ез}}(p)$  – по каналу задание – ошибка;
- $\Phi_{\text{в}}(p)$  – по возмущению.

**Примечание:** обратить внимание, что

$$\Phi(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)} \cdot \frac{1}{W_{\text{тг}}(p)}$$

Оценить качество САР в переходном режиме.

Построить переходную функцию замкнутой САР по передаточной функции  $\Phi_3(p)$  САР по заданию. По графику определить:

- время регулирования  $t_p$ , сек;
- перерегулирование  $\sigma$ , %;
- время нарастания  $t_n$ , сек.

Оценить качество САР в установившемся режиме.

Для этого, по передаточной функции САР  $\Phi_{\text{ез}}(p)$  по каналу задание – ошибка определить коэффициенты ошибок  $c_0$  – по положению,  $c_1$  – по скорости и  $c_2$  – по ускорению. Коэффициенты ошибок определяются разложением функции  $\Phi_{\text{ез}}(p)$  в ряд Лорана, путем деления полинома числителя, записанного в обратном порядке на полином знаменателя, также записанного в обратном порядке [2].

### 3.5 Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Содержание.

3. Исходные данные.
4. Введение (цели и задачи работы, анализ задания и исходных данных, обоснование методов достижения поставленной цели).
5. Основные разделы работы.  
Она должна включать следующие, небольшие по объему разделы, основной частью которых будут рисунки и пояснения к ним:
  - Модель исходной САР и ее анализ;
  - Оценка устойчивости и коррекция (оптимизация) замкнутой САР;
  - Оценка качества оптимизированной САР
6. Заключение (основные результаты работы, выводы о качестве полученной в результате коррекции САР, предложения по ее применению).
7. Список литературы.
8. Приложение.

#### **4 Пример выполнения контрольной работы**

##### **Исходные данные**

$$N = 10$$

##### *Параметры элементов*

У (усилитель) - усилительное, пропорциональное звено:

$$k_y = 10 + N/2 = 10 + 10/2 = 15; W_y(p) = k_y = 15;$$

Г (генератор) – апериодическое звено:

$$k_r = 0,5 \cdot (10 + N/2) = 7,5; T_r = 0,01 \cdot (12 + N/2) = 0,17, \text{ сек.}$$

$$W_r(p) = \frac{7,5}{0,17p + 1}$$

Д – двигатель постоянного тока. Модель двигателя по управлению – апериодическое звено второго порядка:

$$k_{дв} = 0,2 \cdot (13 + N/2) = 3,6 \text{ [об/(сек} \cdot \text{В)]}; T_{я} = 0,01 \cdot (8 + 0,1 N) = 0,09 \text{ сек.}$$

$$T_m = 0,1(4 + 0,2 N) = 0,6 \text{ сек.}$$

$$W_{дв}(p) = \frac{3,6}{0,054p^2 + 0,6p + 1}$$

Д – двигатель по возмущению, моменту нагрузки, имеет параметры и передаточную функцию:

$$k_{\text{дв}} = 0,05(14 + N/2) = 0,95 \text{ [об/(сек} \cdot \text{Н} \cdot \text{м)]};$$

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{-0,95 \cdot (0,09p + 1)}{0,054p^2 + 0,6p + 1}$$

ТГ – пропорциональное звено:

$$k_{\text{ТГ}} = 0,01 \cdot (1 + 0,05 N) = 0,015 \text{ [В} \cdot \text{сек / об]};$$

$$W_{\text{ТГ}}(p) = k_{\text{ТГ}} = 0,015$$

## **Построение структурной схемы САР**

### *Структурная схема САР*

Для построения структуры системы понадобятся следующие блоки: Генератор ступенчатого сигнала (*Step*), сумматор (*Summing Junction*), линейный блок (*Transfer Function*), усилитель (*Gain*), а также виртуальный осциллограф (*Plot*).

В качестве коэффициентов для блоков *Gain* и *Transfer Function* могут выступать как числа, так и переменные. При использовании переменных необходимо заранее присвоить им значения с помощью констант (*Const*) и блока переменных (*Variable*).

### *Переходная функция САР*

Один из способов анализа системы состоит в определении и исследовании ее переходной функции. Для этого на систему следует подать ступенчатое единичное воздействие от соответствующего генератора, а выход системы подключить к виртуальному осциллографу, на экране которого будет изображена реакция системы на ступенчатое воздействие, т.е. ее переходная функция (рисунок 18). Для большей наглядности в свойствах осциллографа на вкладке *Labels* в графе *Title* введем наименование характеристики, добавим наименование горизонтальной и вертикальной оси.

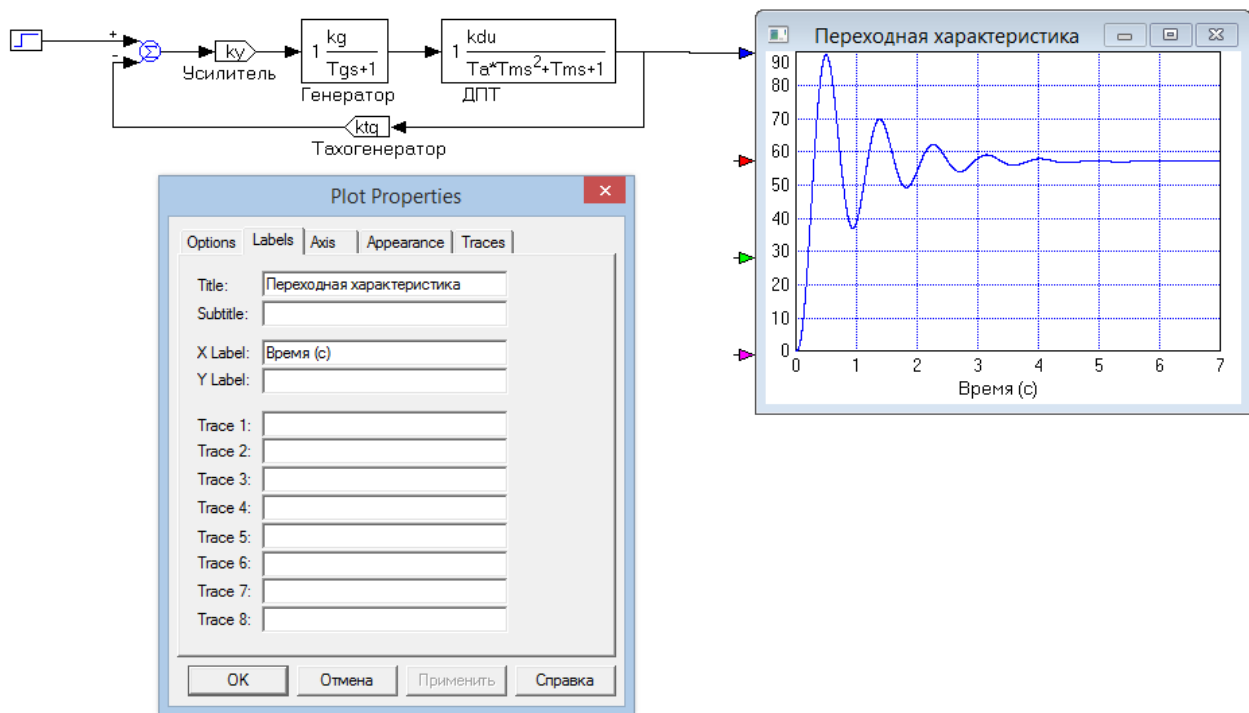


Рисунок 18 – Модель и переходная характеристика исходной САР  
**Анализ исходной САР**

Предметом анализа является качество САР, которое характеризует ее быстродействие и ошибки регулирования. Анализ осуществляется по переходной характеристике замкнутой САР (рисунок 19).

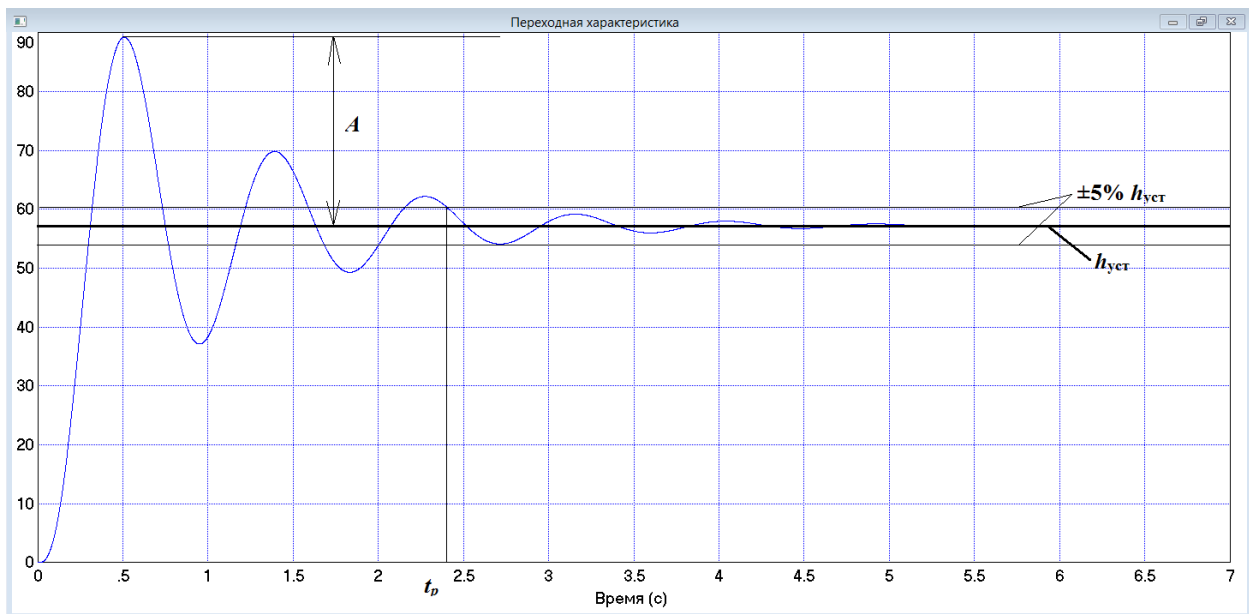


Рисунок 19 – Переходная характеристика исходной САР

Быстродействие САР характеризуется временем регулирования  $t_p$ , которое определяется моментом последнего входа переходной функции в  $5\%$

коридор около установившегося значения переходной функции. В нашем примере время регулирования  $t_p$  составляет 2,4 с.

Точность регулирования в переходном режиме характеризуется показателем качества, называемым перерегулирование  $\sigma$

$$\sigma = (A/h_{уст}) 100\%$$

Для рисунка 19 перерегулирование  $\sigma = 73\%$ , что существенно превышает допустимые показатели.

Точность работы САР в установившемся режиме тоже может быть оценена по рисунку. Учитывая величину коэффициента усиления тахогенератора, равную 0,015, можно сказать, что при безошибочной работе САР установившееся значение выходного сигнала (частоты вращения вала) составило бы  $1/0,015 = 66$  об/сек. На самом деле, как видно на рисунке 20, у исходной САР установившееся значение выходного сигнала составляет 57 об/сек. Относительная величина ошибки регулирования, при отслеживании постоянного сигнала составляет:

$$c_0 = (66 - 57)/5 = 1,8,$$

что считается слишком большой величиной. Для статических САР считается приемлемым

$$0.01 < c_0 < 0.1.$$

Таким образом, если качество регулирования рассматриваемой САР в переходном и установившемся режиме требует коррекции САР.

Коррекция может быть осуществлена изменением усиления контура регулирования, а если этого окажется недостаточно, то и введением ПИ-регулятора в контур.

### **Анализ частотных характеристик и коррекция САР**

Качество САР может оцениваться непосредственно по ее переходной характеристике или, косвенно, по запасам устойчивости, которые могут быть определены по логарифмическим амплитудно- и фазочастотной характеристикам разомкнутого контура. Обеспечив хорошие запасы устойчивости и усиление контура, можно получить качественную САР.

### Оценка устойчивости и стабилизация разомкнутого контура

Цель: обеспечить выполнение необходимого условия практического применения критерия устойчивости Найквиста. Это условие состоит в том, что разомкнутый контур должен быть устойчивым.

Задача: проверить устойчивость разомкнутого контура. Способ решения задачи – построение и анализ переходной характеристики разомкнутого контура.

Разомкнуть контур, отсоединив выход тахогенератора от сумматора и подключить его к осциллографу. Выход ДПТ отсоединить от осциллографа.

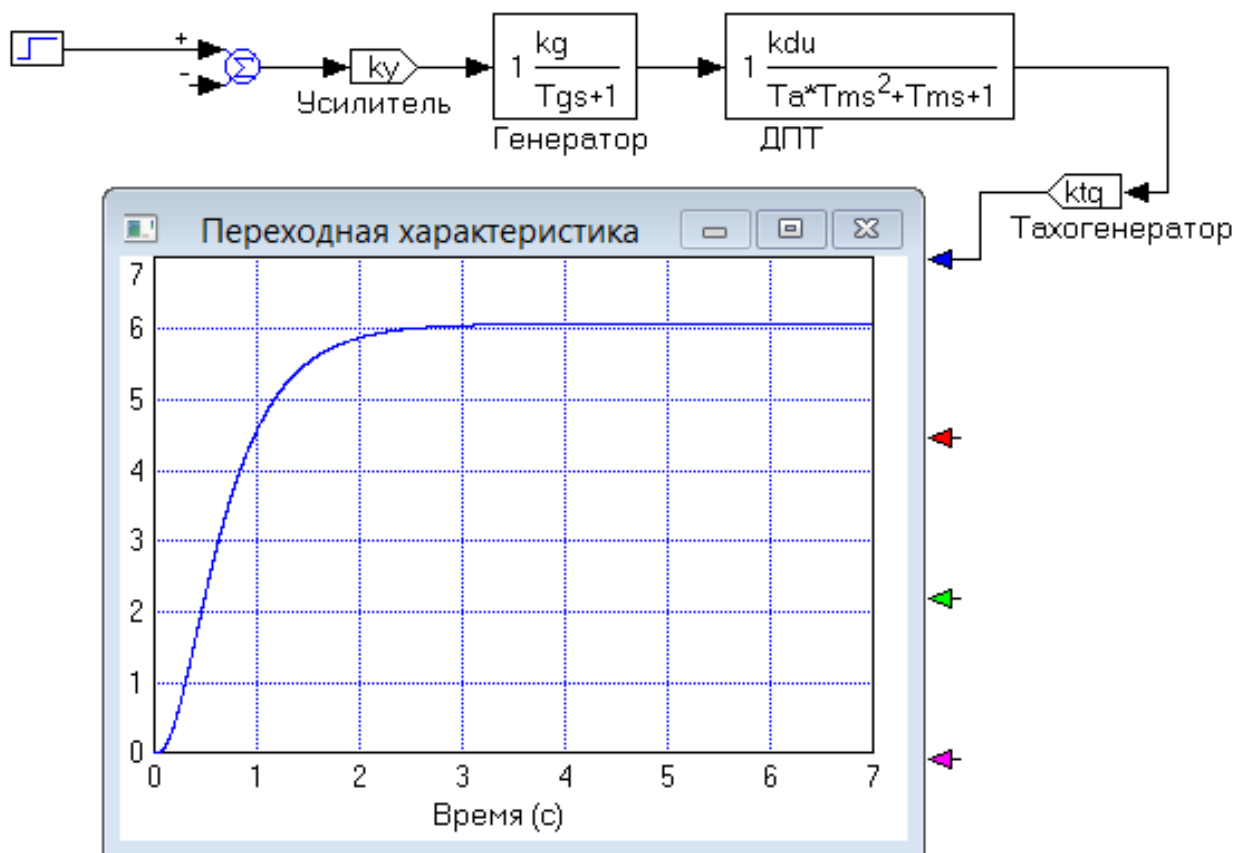


Рисунок 20 – Разомкнутый контур САР

Разомкнутый контур устойчив, условие применения критерия Найквиста выполнено.

### Построение ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура

В соответствии с критерием устойчивости Найквиста, степень устойчивости замкнутой САР оценивается по логарифмическим характеристикам разомкнутого контура.

Порядок построения ЛАЧХ и ЛФЧХ в программе VisSim следующий.

1) Выделить элементы контура, начиная от сумматора и заканчивая тахогенератором. Генератор ступенчатого сигнала и осциллограф не должны быть выделены.

2) В меню VisSim *Analyze* выбрать *Frequency Response*. В верхней левой части рабочего пространства появятся окна ЛАЧХ (*Bode Magnitude*) и ЛФЧХ (*Bode Phase*). Окна нужно растянуть и расположить ЛФЧХ точно под ЛАЧХ.

3) Показать сетки координат на графиках и сделать надписи по-русски. Для этого дважды щелкнуть по окну с ЛАЧХ, на первой вкладке *Options* поставить галочку в прямоугольнике *Grid Lines*, перейти на вкладку *Labels* и ввести заголовок окна и название осей (рисунок 21):

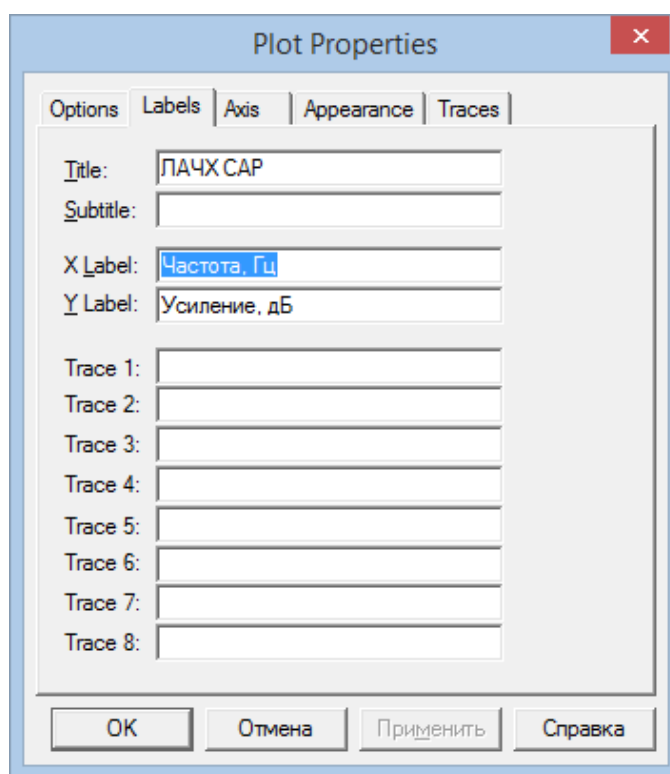


Рисунок 21 – Настройка окна ЛАЧХ

4) Аналогично показать сетку координат на ЛФЧХ и сделать надписи в заголовке окна «ЛФЧХ САР», а по осям «Частота, Гц» и «Аргумент, градусы». Кроме того, изменить шаг сетки по вертикали. Для этого, щелкнув дважды по окну ЛФЧХ, перейти на вкладку *Axis* (Оси), поставить нижний предел вертикальной оси (*Y Lower Bound*) равным  $-270^0$ , поставить галочку



*Fixed Tick Count* (фиксированное число делений), задать число делений вертикальной оси *Y Divisions* равным 3 (или 6):

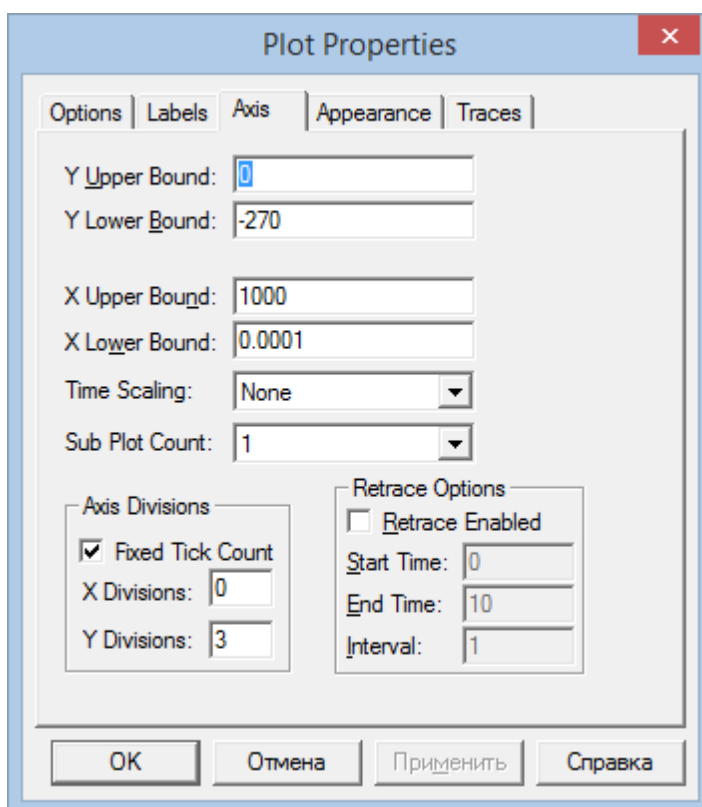


Рисунок 22 – Настройка окна ЛФЧХ

Для изменения частотного диапазона, в котором строится ЛАЧХ, в меню *VisSim Analyze* выбрать *Frequency Range* и установить начальное и конечное значения частотного диапазона. Например, *Start* – 0,001, *End* 1000, число шагов *Step Count* 1000.

У хороших систем запас устойчивости по амплитуде  $L$  лежит в диапазоне 12 – 20 дБ, запас устойчивости по фазе  $\gamma$  находится в пределах  $35^\circ$  –  $65^\circ$  и более, а усиление статической системы на нижних частотах составляет 20 - 40 дБ. Для астатических систем, имеющих интегратор в контуре управления по отклонению, коэффициент усиления косвенно характеризует быстродействие системы, поэтому его величина определяется требуемым быстродействием.

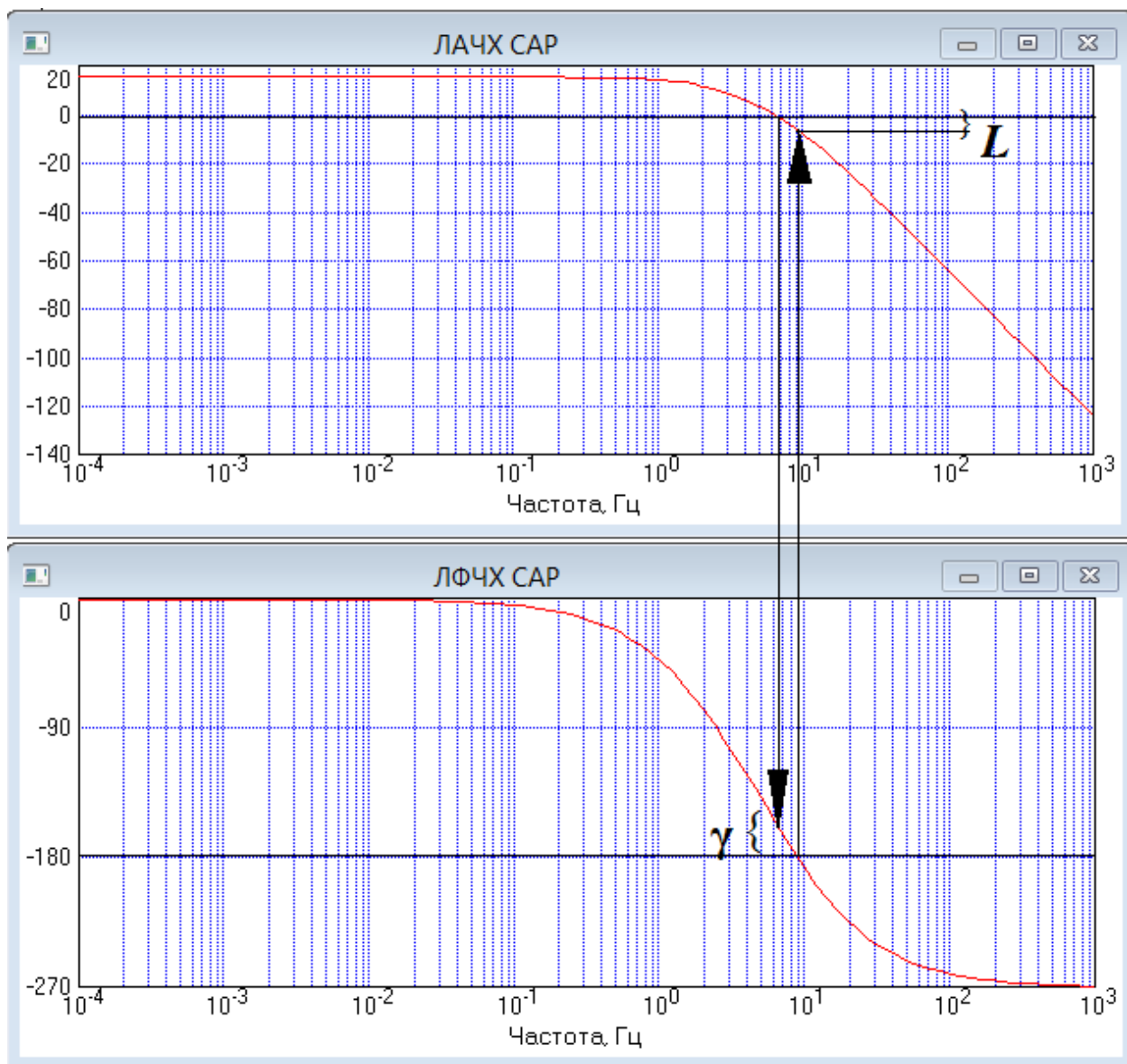


Рисунок 23 – ЛАЧХ и ЛФЧХ исходной САР. Запас устойчивости по модулю  $L = 5$  дБ, запас устойчивости по фазе  $\gamma = 23^\circ$ .

#### *Коррекция коэффициента усиления контура*

Как видно на рисунке 23, запасы устойчивости находятся вблизи нижних значений. Усиление на нижних частотах находится в пределах нормы. Для повышения качества системы следует попробовать понизить (а в некоторых вариантах и повысить) усиление контура, путем введения П-регулятора – усилителя сразу после сумматора. Введение П-регулятора приведет к опусканию (поднятию) ЛАЧХ, в то время как ЛФЧХ, не зависящая от коэффициента усиления, останется на месте. В результате

сместится частота среза и запасы устойчивости увеличатся, но усиление контура упадет.

Поскольку в схеме уже есть усилитель, то его и будем рассматривать как П-регулятор, понизив его усиление ( $k_y = 10$ ).

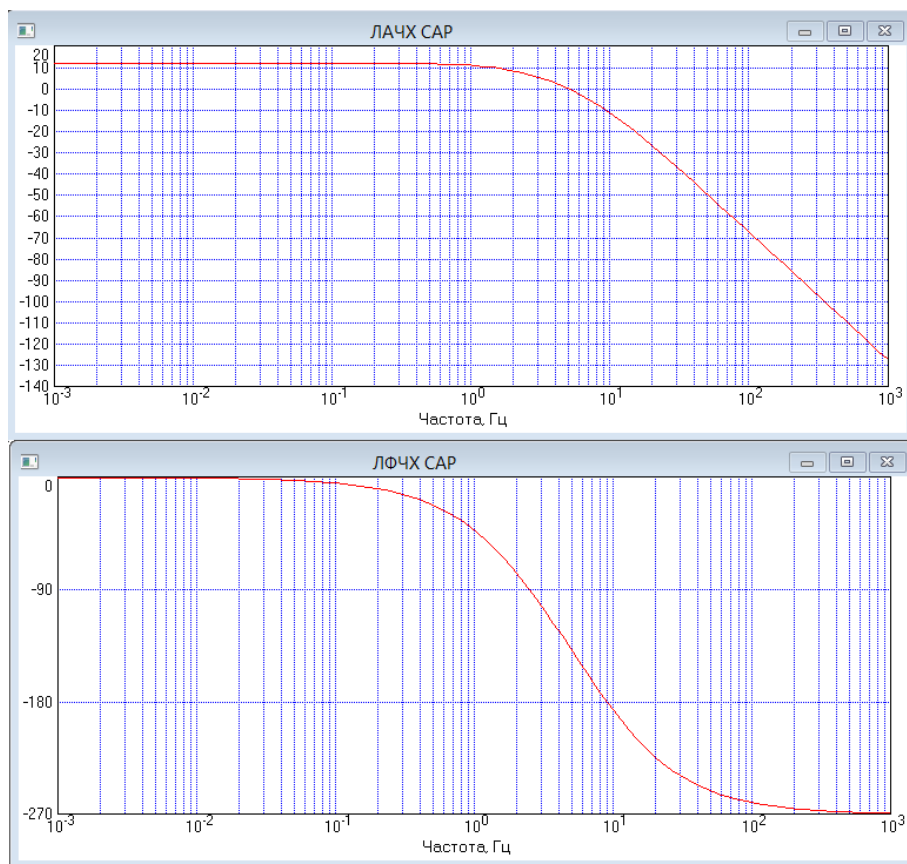
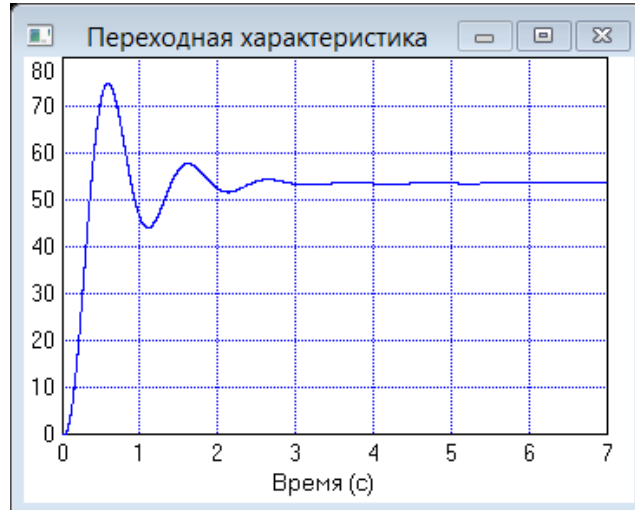


Рисунок 24 – Переходная характеристика и ЛАЧХ с ЛФЧХ скорректированной САУ

Определить показатели качества полученной САУ (запасы устойчивости, время переходного процесса, точность и величину перерегулирования.)

В данном случае усиление оптимизировано, достигнут некоторый компромисс для обеспечения качества переходного и установившегося режимов. Колебательность характеристики снизилась практически вдвое (36%), ошибка установившегося режима почти не изменилась, время переходного процесса снизилось до 1,8 с.

### **Структурно-параметрическая оптимизация САР**

Структурно-параметрическая оптимизация в данном простейшем случае подразумевает введение ПИ-регулятора, что изменяет структуру САР, и подбор его наилучших параметров.

Задача состоит в том, чтобы улучшить переходную характеристику САР, снизить ее колебательность, и уменьшить ошибки установившегося режима.

#### *Определение настроечных параметров ПИ-регулятора*

Ниже предлагается простой приближенный способ определения настроечных параметров ПИ-регулятора с использованием ЛАЧХ и ЛФЧХ предварительно скорректированной САР, полученных в предыдущем пункте. Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид:

$$W_{\text{ПИ}}(p) = \frac{k_p(T_p p + 1)}{T_p p}$$

где

$k_p$  – коэффициент усиления ПИ-регулятора;

$T_p$  – постоянная времени ПИ-регулятора.

Для определения постоянной времени регулятора следует взять ЛАЧХ (рисунок 24), для которой выполнены требования к запасам устойчивости по фазе и амплитуде, и провести к ней касательные с наклонами 0 дБ/дек и -20

дБ/дек. Точка сопряжения линий аппроксимации, касательных будет находиться на частоте  $1/T_p$ . Соответственно  $T_p = 1/\omega_p$ .

Хорошим начальным приближением для коэффициента усиления  $k_p$  ПИ-регулятора является значение 0,5, которое можно затем уточнить методом проб.

### *Модификация схемы и задание параметров ПИ-регулятора*

Остается ввести ПИ-регулятор в схему модели. Вынести на рабочее пространство блок *Transfer Functions* и установить его за сумматором главного контура управления, перед усилителем рисунок 25.

Подбираем  $k_p$  для появления перерегулирования, меньшего 5%. Это и будет оптимальной схемой.

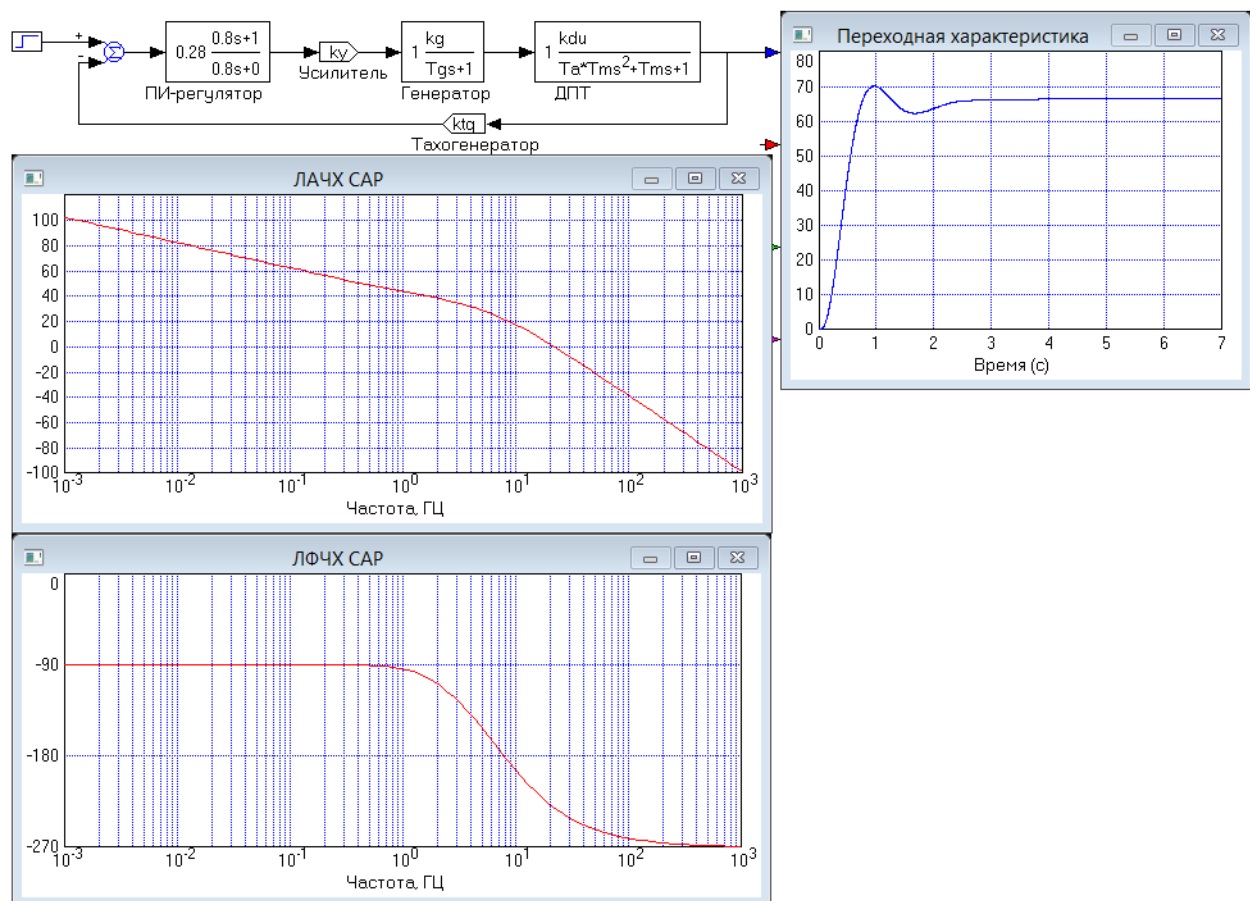


Рисунок 25 – Оптимизированная схема САР

Оформить контрольную работу в виде пояснительной записки объемом 5-7 страниц, привести рисунки, соответствующие рисункам 18-28.

## Список литературы

1. Советов Б.Я., Моделирование систем: Практикум: Учебное пособие для вузов – М.:Высшая школа, 2005
2. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. -4-е изд. – СПб, Изд-во «Профессия», 2003
3. Клиначёв Н.В., Теория систем автоматического регулирования: Учебно-методический комплекс, 2005
4. Сайт о моделировании явлений и объектов: <http://model.exponenta.ru/>
5. Н. В. Клиначёв. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ В ПРОГРАММЕ VisSim Справочная система. 2001. (877 КБ) на русском языке. <http://model.exponenta.ru/vsmhlpru.zip>
6. Федосов Б.Т. Оценка качества установившегося режима САР. 2003 г. [http://model.exponenta.ru/bt/bt\\_0004.html](http://model.exponenta.ru/bt/bt_0004.html)
7. Федосов Б.Т., Клиначев Н.В. О построении области устойчивости линейной системы по некоторому параметру стандартными средствами программ математического моделирования. 2002 г. [http://model.exponenta.ru/d\\_region.html](http://model.exponenta.ru/d_region.html)

*Кузнецова Елена Михайловна*

## **ВВЕДЕНИЕ В МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Методические указания  
к выполнению контрольной работы  
для студентов заочной формы обучения  
направлений 15.03.04, 27.03.04

Авторская редакция

---

Подписано в печать 05.04	Формат 60x84 1/1	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл. печ. л. 2,00	Уч. изд. л. 2,00
Заказ №63	Тираж 25	Цена свободная

---

РИЦ Курганского государственного университета.  
640020, г. Курган, ул. Советская, 63.  
Курганский государственный университет.