

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н. М. Матвейчук, А. Г. Сеньков

**ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по образованию в области автоматизации технологических
процессов, производств и управления в качестве
учебно-методического пособия для студентов учреждений
высшего образования по направлению специальности
1-53 01 01-09 «Автоматизация технологических процессов
и производств (сельское хозяйство)»*

Минск
БГАТУ
2019

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7
М33

Рецензенты:
кафедра «Робототехнические системы»
Белорусского национального технического университета
(кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой *А. Р. Околов*);
кандидат технических наук, доцент,
ученый секретарь РУП «НПЦ НАН Беларуси
по механизации сельского хозяйства» *Ю. Л. Саланура*

Матвейчук, Н. М.
М33 Теория автоматического управления. Лабораторный практикум :
учебно-методическое пособие / Н. М. Матвейчук, А. Г. Сеньков. –
Минск : БГАТУ, 2019. – 188 с.
ISBN 978-985-25-0017-3.

Приведен теоретический материал по математическому описанию звеньев и систем автоматического управления, синтезу непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования и методические указания по выполнению лабораторных работ с использованием системы компьютерных расчетов MATLAB и входящего в ее состав пакета имитационного моделирования динамических систем Simulink.

Для студентов учреждений высшего образования по направлению специальности 1-53 01 01-09 «Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство)».

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7

ISBN 978-985-25-0017-3

© БГАТУ, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Модуль 1. ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	
Лабораторная работа № 1. Изучение MATLAB на примерах моделирования отдельных элементов САП.....	5
Лабораторная работа № 2. Изучение математического описания и методов получения статических характеристик линейных звеньев.....	23
Лабораторная работа № 3. Изучение математического описания и методов получения частотных характеристик линейных звеньев.....	46
Лабораторная работа № 4. Линеаризация гладких нелинейных характеристик звеньев систем автоматизации.....	66
Лабораторная работа № 5. Идентификация объектов управления и средств автоматизации.....	75
Модуль 2. ЛИНЕЙНЫЕ НЕПРЕРЫВНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	
Лабораторная работа № 6. Исследование разомкнутого и замкнутого управления.....	95
Модуль 3. ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	
Лабораторная работа № 7. Исследование систем с пропорциональным законом (П-законом) регулирования.....	109
Лабораторная работа № 8. Исследование систем с интегральным законом (И-законом) регулирования.....	126
Лабораторная работа № 9. Синтез систем автоматического регулирования.....	135
Лабораторная работа № 10. Исследование двухпозиционного регулятора и двухпозиционных систем.....	148
Лабораторная работа № 11. Исследование трехпозиционного регулятора и трехпозиционных систем.....	163
Модуль 4. ДИСКРЕТНЫЕ, ОПТИМАЛЬНЫЕ, РОБАСТНЫЕ, АДАПТИВНЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	
Лабораторная работа № 12. Исследование цифровых систем автоматического управления.....	174
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	184

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум содержит теоретический материал по математическому описанию звеньев и систем автоматического управления, синтезу непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования, методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теория автоматического управления».

Теория автоматического управления при изучении процессов управления абстрагируется от физических и конструктивных особенностей систем и вместо реальных систем рассматривает их адекватные математические модели. Основными методами исследования в теории автоматического управления являются математическое и компьютерное моделирование, теория дифференциальных и логических уравнений.

Выполнение лабораторных работ по дисциплине «Теория автоматического управления» направлено на изучение математического описания и характеристик звеньев (модуль 1) и систем автоматического управления (модуль 2), свойств и методов синтеза непрерывных (модуль 3) и цифровых (модуль 4) систем автоматического регулирования с типовыми линейными законами регулирования.

Лабораторный практикум содержит теоретический материал и методические указания по выполнению лабораторных работ. При выполнении лабораторных работ предполагается широкое использование системы компьютерных расчетов MATLAB и входящего в ее состав пакета имитационного моделирования динамических систем Simulink.

В целях упрощения работы с лабораторным практикумом:

- задания и порядок их выполнения выделены рамками. Вне рамок располагаются теоретические сведения и поясняющие тексты;
- названия блоков, команд, кнопок и обозначения, используемые в MATLAB и Simulink, выделены шрифтом;
- для англоязычных названий команд при их первом упоминании в скобках приведен русскоязычный аналог.

МОДУЛЬ 1. ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ MATLAB НА ПРИМЕРАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ САР

Цель работы: ознакомиться с системой компьютерных расчетов MATLAB для моделирования элементов систем автоматического регулирования.

Задание:

1. Ознакомиться с основным окном MATLAB.
2. Ознакомиться с работой с выражениями и переменными.
3. Ознакомиться с математическим описанием линейных звеньев.
4. Ознакомиться с построением графиков функций.
5. Ознакомиться с созданием М-файлов.
6. Ознакомиться с построением моделей в Simulink.
7. Сделать выводы.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Работа выполняется на персональных ЭВМ с использованием системы компьютерных расчетов MATLAB и входящего в ее состав пакета компьютерного моделирования Simulink.

Выполнение работы

1. Основное окно MATLAB

Запуск MATLAB: из главного меню Windows Пуск→Все программы→MATLAB или двойным щелчком по соответствующей иконке на рабочем столе. Основное окно MATLAB показано на рис. 1.

Основные элементы рабочего окна:

- строка меню;
- панель инструментов с кнопками и раскрывающимся списком;
- окно *Workspace* (Рабочая область) – отображает рабочее пространство, т. е. используемые в работе переменные, константы, массивы и другие объекты, а также их размеры в байтах;
- окно *Command History* (Команды) – окно, предназначенное для просмотра и повторного вызова ранее введенных команд;

– окно **Command Window** (Окно команд) – окно для ввода чисел, выражений, переменных, формул и команд, для просмотра результатов вычислений, для отображения текстов выполняемых программ, а также для вывода сообщений об ошибках.

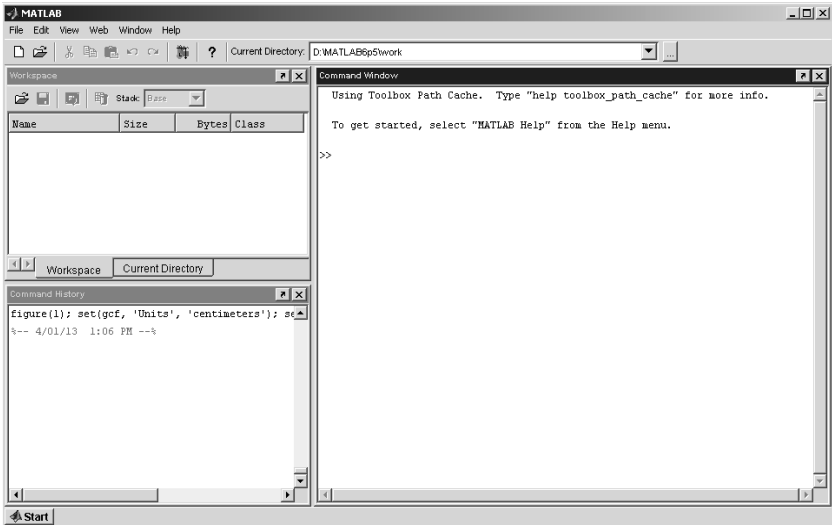


Рис. 1. Вид основного окна MATLAB

Можно отобразить или скрыть соответствующие окна, поставив или сняв галочку в соответствующей строке меню **View** (Вид) основного меню **MATLAB**.

В начале работы все три подокна пустые.

Сделайте активными по очереди все окна рабочей среды **MATLAB**. Скройте и затем снова включите окно **Workspace**.

Работа в среде **MATLAB** может осуществляться в программном режиме или в командном (диалоговом). Основным элементом командного режима работы с системой является окно **Command Window**.

Сеанс работы с системой **MATLAB** называется сессией. Иными словами, сессия – это все то, что отображается в командном окне в процессе работы с системой. Команды сессии автоматически образуют список, который выводится в окне **Command History**, а значения и размерность переменных сохраняются в окне **Workspace**.

Строка в текстовом поле **Command Window**, отмеченная символом приглашения `>>` с мигающим курсором, называется **строкой ввода** или **командной строкой**. Она предназначена для ввода с клавиатуры команд, чисел, имен переменных и знаков операций, составляющих выражение. Для выполнения введенной команды или вычисления заданного выражения, следует нажать клавишу **Enter (Ввод)** – при этом курсор может находиться в любом месте командной строки.

Результаты появляются в одной или нескольких строках командного окна – **строках вывода** (без приглашающего символа `>>`). Для просмотра выполненных команд и результатов вычислений, не уместяющихся на экране, имеются полосы горизонтальной и вертикальной прокрутки.

2. Работа с выражениями и переменными в MATLAB

Если результату операции не было присвоено имя, он автоматически обозначается `<ans>`.

Введите в командную строку
`>> 2 + 3`
и нажмите **Enter**. Убедитесь в том, что переменная `ans` появилась в окне **Workspace**.

Окно **Workspace** содержит таблицу. При щелчке правой кнопкой мыши на строке с именем переменной в окне **Workspace** появляется всплывающий список команд, позволяющих переименовать переменные, удалить лишние, сохранить рабочую среду и т. д. Команда **Open (Открыть)** (или двойной щелчок по строке с именем переменной в окне **Workspace**) приводит к отображению этой переменной в матричном виде в отдельном окне **Array Editor (Редактор массивов)**. В этом окне в соответствующих полях задается размер матрицы – число ее строк и столбцов – и далее вводятся числа, выражения, переменные и функции в отдельные клетки появившейся таблицы. Этот способ обеспечивает быстрый доступ к элементам матрицы и позволяет их вводить или редактировать в произвольном порядке.

Откройте окно **Array Editor** для переменной `ans` двумя способами.

При вычислении следующего непоименованного результата значение переменной `ans` меняется.

Ведите в командную строку
`>> 10`
и нажмите Enter. Откройте окно Array Editor для переменной `ans` и убедитесь в том, что переменная `ans` поменяла свое значение.

Значение переменной `ans` можно использовать в вычислениях. Знаком присваивания является знак `<=>`.

Введите в командную строку
`>> a = 18 - ans`
и нажмите Enter. Проверьте, что переменная `a` появилась в окне Workspace.

При использовании команды `disp(выражение)`, значение выражения не присваивается переменной `ans`.

Введите в командную строку
`>> disp(2^4)`
и нажмите Enter. Убедитесь в том, что переменная `ans` сохранила свое значение.

Результат выполнения команды, заканчивающейся символом `;`, на экран не выводится, но он сохраняется в памяти и может быть использован в последующих вычислениях.

Введите в командную строку
`>> b = cos(pi);`
и нажмите Enter. Убедитесь в том, что переменная `b` появилась в окне Workspace.

В одной командной строке можно ввести несколько команд, разделяя их запятыми либо точками с запятой. Система MATLAB выполняет каждую команду, за которой следует запятая, и отображает результаты в отдельных строках.

Набрав в строке ввода имя переменной или `disp(имя переменной)` и нажав Enter, можно вывести значение любой переменной в командное окно.

Введите в командную строку
`>> a, A = 2/3; disp(b)`
и нажмите Enter. Убедитесь в том, что переменная `A` появилась в окне Workspace.

Если требуется ввести в окне Command Window команду, не помещающуюся на одной строке, перед нажатием клавиши Enter

следует ввести ..., и продолжить набор команды на следующей строке (на ней не будет символа приглашения >>).

Введите в командную строку
>> c=.5+exp(1)+...
A-b+2*a
и нажмите Enter. Обратите внимание, что для отделения целой части числа используется точка, а не запятая (0 можно не вводить).

Редактировать можно только выражения в командной строке. Вся остальная информация находится в зоне просмотра. В строке ввода можно перемещать курсор с помощью клавиш → и ←.

Клавиши ↑ и ↓ служат для возврата в строку ввода ранее выполненных команд в целях их повторного выполнения или редактирования. Можно также копировать содержимое рабочего окна с помощью мыши и затем вставлять его в строку ввода.

С помощью клавиш ↑ и ↓ верните в строку ввода первую команду (2+3) и исправьте ее на (2-3). Нажмите Enter. Убедитесь, что при этом значение переменной **a** по-прежнему равно 8.

Можно также выполнить ранее введенную команду двойным щелчком мыши на этой команде в окне Command History или выделить в этом окне нужную последовательность команд с помощью комбинации клавиш Shift+↑ и Shift+↓ и скопировать ее в командную строку.

После вставки команд в строку ввода их можно редактировать, а выполняться они будут лишь после нажатия клавиши Enter. Причем если было скопировано сразу несколько строк, то при их редактировании *можно* использовать клавиши ↑ и ↓.

Скопируйте из окна Command History три последние строки (начиная с символа c) и исправьте их следующим образом:
>> c=.5+3-exp(1)+10e8+4.46e-3
'2 - 3'

Выражения, заключенные между двумя апострофами, не вычисляются и чаще всего служат для вставки текста в графические объекты и для описания символьных переменных.

Для записи комплексных чисел в качестве мнимой единицы можно использовать как *i*, так и *j*. Следующие записи эквивалентны:

$$1 + i*2 \sim 1 + j*2 \sim 1 + 2*i \sim 1 + 2*j \sim 1 + 2i \sim 1 + 2j.$$

Если вместо числа переменная или мнимая единица расположена перед числом, знак умножения обязателен.

Введите в командную строку последовательно

```
>>i  
>>j  
>>z = 1 + 2i
```

Значения модуля ρ и фазы φ комплексного числа можно определить с помощью встроенных функций $\rho = \text{abs}(z)$ и $\varphi = \text{angle}(z)$.

Введите в командную строку

```
>> abs(z), angle(z)
```

Для *точного* решения уравнений в MATLAB используется команда `solve('уравнение')`.

Введите в командную строку выражение

```
>> D = solve('x^3=-8')
```

и нажмите Enter. Чтобы теперь обратиться к первому корню, нужно ввести его номер в скобках после имени переменной – массива корней:

```
>> D(1)
```

Если предварительно объявить символьную переменную, можно выражение не приравнять к нулю, тогда апострофы не нужны.

Введите в командной строке

```
>>x = sym('x'); D = solve(x^2-2*x+4)
```

Вектор – это упорядоченный перечень чисел, разделенных запятыми или пробелами, заключенный в квадратные скобки.

Введите в командную строку последовательно, каждый раз нажимая Enter:

```
>> V1 = [-2 0 1 4]  
>> V2 = [1.3; 5.4; 6.9]  
>> V3 = [1,3,0;-2 -2 5]  
>> V1'
```

Сделайте выводы о вводе матриц-строк, матриц-столбцов, транспонировании матриц.

Откройте окно `Array Editor` для переменной `V2` и замените число 5.4 числом 5.8.

Полином $P(x) = a_0x^n + \dots + a_{n-1}x + a_n$ в MATLAB вводится и хранится в виде вектора, элементами которого являются коэффициенты полинома (начиная со старшей степени):

$$P = [a_0 \dots a_{n-1} a_n].$$

Вектор, элементы которого являются *приближенными* корнями заданного полинома, возвращает команда `roots(P)`.

Для ввода в MATLAB полинома $2x^2 + 3x - 5$ и нахождения его корней выполните следующие команды:

```
>> P1=[2 3 -5]
```

```
>> roots(P1)
```

Введите в MATLAB полином $x^2 - 5$ и найдите его корни.

3. Математическое описание линейных звеньев в MATLAB

Команда, задающая линейное звено с одним входом и одним выходом в виде передаточной функции, имеет следующий синтаксис:

$$tf([b_0, b_1, \mathbf{K}, b_{m-1}, b_m], [a_0, a_1, \mathbf{K}, a_{n-1}, a_n]),$$

где $b_0, b_1, \mathbf{K}, b_{m-1}, b_m$ и $a_0, a_1, \mathbf{K}, a_{n-1}, a_n$ – значения коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции звена (системы).

Введите в MATLAB следующую передаточную функцию звена:

$$W(s) = \frac{144s + 288}{s^3 + 15s^2 + 62s + 48}.$$

Найдите значения ее нулей (корней числителя) – команда `zero` и полюсов (корней знаменателя – характеристического полинома) – команда `pole`. Введите в командную строку последовательно следующие команды:

```
>> w = tf([144 288], [1 15 62 48])
```

```
>> zero(w)
```

```
>> pole(w)
```

Переходная характеристика $h(t)$ – это процесс изменения сигнала на выходе системы при подаче на вход единичного ступенчатого воздействия.

Импульсная переходная характеристика $w(t)$ – это процесс изменения сигнала на выходе при подаче на вход δ -функции.

Постройте в MATLAB временные характеристики системы, введя в командную строку последовательно следующие команды:

```
>> step(w)
>> impulse(w)
```

и рассмотрите полученные графики.

Время моделирования выбирается автоматически. При необходимости его можно явно указать в команде

```
>>step(w, t),
```

где t – время моделирования, с.

Построение асимптотических АЧХ и ФЧХ. При определении частотных характеристик подразумевается, что на входе и выходе системы сигналы являются гармоническими.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) показывает, как изменяется отношение выходного сигнала к входному в зависимости от частоты.

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) показывает изменение сдвига фаз между входным и выходным сигналами в зависимости от частоты.

Постройте частотные характеристики звена.

По передаточным функциям можно получить графическое изображение логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик – ЛАХ и ЛФХ, с помощью команды `bode`:

```
>> bode(w)
```

Используя ЛАЧХ и ЛФЧХ, можно оценить запасы устойчивости системы по амплитуде и по фазе с помощью команды

```
>> margin(w)
```

Для получения амплитудно- и фазочастотной характеристик системы, имеющей известную передаточную функцию, используется команда `freqs` с двумя аргументами: первый вектор представляет собой коэффициенты числителя, начиная с коэффициента у переменной s в старшей степени, а второй – коэффициенты знаменателя в той же последовательности.

```
>> freqs([144 288], [1 15 62 48])
```

Графики имеют аналогичный вид, но на первом графике по оси ординат указаны значения амплитуды (`magnitude`) в абсолютных

единицах при логарифмическом масштабе по оси абсцисс (частот) и автоматически нанесена сетка на оба графика.

Для построения АФЧХ достаточно вызвать команду `nyquist`:
`>> nyquist(w)`

Чтобы отображались только положительные частоты, следует выполнить щелчок правой клавишей мыши по полученному графику и в пункте меню `Show` → `Negative Frequencies` убрать галочку.

Команда очистки экрана `clc` стирает содержание командного окна MATLAB и размещает символ приглашения `>>` в левом верхнем углу пустого экрана. При этом остается неизменным содержимое окон `Command History` и `Workspace` и можно продолжать пользоваться значениями переменных, полученных до ввода команды `clc`. Для удаления из памяти всех переменных используется команда `clear`. Если за ней через пробел указать список переменных, то только они будут удалены из памяти.

Очистите экран, затем удалите из памяти вначале только переменные `V1`, `V2` и `V3`, а затем все остальные.

По завершении сеанса работы с системой MATLAB все использованные переменные теряются, однако можно сохранить содержимое рабочего пространства, использовав команду меню `File/Save Workspace As...`, и загрузить его в новой сессии.

4. Построение графиков функций в MATLAB

Построение графика функции одной переменной (или нескольких таких графиков) в линейном масштабе осуществляется с помощью команды `plot(t, x)` или `plot(t, x, t, y)`. В скобках на первом месте стоит аргумент, на втором – функция.

Для вычерчивания нескольких графиков в одном окне применяется дополнительный параметр команды `plot()`, заключенный в апострофы и определяющий цвет линии, тип маркера и стиль линии (см. табл. 1).

Символы, определяющие цвет, тип маркера, стиль линии и находящиеся внутри апострофов, могут располагаться в любой последовательности. Внутри апострофов могут располагаться один, два или три таких символа.

На график можно нанести:

- координатную сетку (команда `grid on`);
- подписи к осям абсцисс и ординат (команды `xlabel(...)`, `ylabel(...)`);

- заголовок (команда `title(...)`);
- легенду (команда `legend(...)`).

Таблица 1

Список параметров команды `plot()`

Цвет	Тип маркера	Стиль линии
y желтый	. точка	- сплошная
m розовый	o кружок	: пунктирная
c голубой	x крестик	-. штрихпунктирная
r красный	+ знак «плюс»	-- штриховая
g зеленый	s квадрат	
b синий	d ромб	
w белый	v треугольник вершиной вниз	
k черный	^ треугольник вершиной вверх	
	< треугольник вершиной влево	
	> треугольник вершиной вправо	
	p пятиконечная звезда	
	h шестиконечная звезда	

При составлении легенды следует учитывать, что порядок следования и количество аргументов команды `legend(...)`, заключенных в апострофы, должны быть согласованы по порядку следования функций и по их количеству.

Последним дополнительным аргументом `legend(...)` может быть положение легенды в графическом окне, а именно:

–1 – вне графика в правом верхнем углу;

0 – выбирается лучшее положение в пределах графика так, чтобы как можно меньше перекрывать сами графики;

1 – в правом верхнем углу графика (это положение используется по умолчанию);

2, 3, 4 – соответственно в верхнем левом углу, в нижнем левом углу и в нижнем правом углу графика.

Легенду можно перетаскивать левой клавишей мыши.

Вычертите графики двух функций $y_1(t) = \sin t$ и $y_2(t) = \sin 3t$ при изменении t в пределах от -2π до 2π с шагом $0,1\pi$. Для этого введите следующие команды:

```
>> t=[-2*pi:0.1*pi:2*pi];  
>> y1=sin(t);  
>> y2=sin(t).^3;  
>> plot(t,y1,'-m',t,y2,'ok')  
>> grid on  
>> title('Periodic Functions')  
>> xlabel('Time, c')  
>> ylabel('Amplitude (V)')  
>> legend('First','Second',4)
```

Для *сохранения* графика в среде MATLAB следует:

1) в выпадающем меню File графического окна выбрать строку Save As...;

2) в появившемся окне указать, в какой папке и под каким именем сохранить файл.

Для *экспорта* графика в другое приложение Windows следует:

1) в выпадающем меню File графического окна выбрать строку Export;

2) в появившемся окне указать, в какой папке, под каким именем и с каким расширением сохранить файл. При этом тип файла должен быть таким, чтобы с ним могло работать выбранное приложение Windows.

Экспортируйте полученный график в текстовый редактор Word, используя расширение .bmp.

Команда `plotyy(...)` выводит графики двух функций в одно окно с двумя осями ординат (справа и слева), имеющими подходящий масштаб.

Введите в командную строку следующие команды:

```
>> t=[0:0.01:2];  
>> y=exp(2*t).*cos(10*t);  
>> x=100*sin(50*t);  
>> plotyy(t,x,t,y)
```

5. Создание М-файлов

М-файлы – это текстовые файлы (с расширением .m), содержащие команды системы MATLAB. Их можно вызывать из командной строки или из другого М-файла.

Различают два типа М-файлов: файлы-программы (без входных и выходных переменных) и файлы-функции (с входными и выходными переменными).

При выполнении М-файл может использовать все определенные в системе переменные (имеющиеся в *Workspace*). В свою очередь, все переменные, созданные во время работы *файла-сценария*, остаются в рабочем пространстве MATLAB и после окончания его выполнения (являются глобальными). Внутренние переменные, которые использует *файл-функция*, являются локальными – не сохраняются в рабочей области, а если переменные с такими же именами были в рабочей области ранее, их значения не изменятся.

Для создания и редактирования М-файла следует выбрать пункт меню **File**→**New**→**M-file**. В результате на экране появится окно (с предлагаемым по умолчанию названием **Untitled**) для ввода последовательности команд.

Для сохранения введенной программы в окне, в котором набрана программа, нужно выбрать пункт меню **File**→**Save As...**, в появившемся диалоговом окне сохранения файла указать папку и имя файла (английскими символами без пробелов) и нажать кнопку **Сохранить**.

Выполнить набранную программу можно одним из следующих способов:

- в окне с программой выбрать пункт меню **Debug**→**Run** либо нажать клавишу **F5**;
- набрать в командной строке имя М-файла (без расширения) и нажать **Enter**.

Создайте файл-функцию с именем `myfun` и следующим текстом:
`function y=myfun(x);`
`y=cos(10*x).*(sin(x)+0.1*sin(100*pi*x));`

Если при выводе графика функции трудно выбрать подходящий шаг дискретизации, то можно воспользоваться командой `fplot('имя файла-функции', [a, b])`, где первым входным аргументом является имя файла-функции, а вторым – вектор, элементы которого есть границы отрезков.

Введите в командную строку окна **Command Window** следующий текст:
`>> y=myfun(x);`
`>>fplot('myfun', [0, 1])`



6. Создание модели в Simulink

Система имитационного моделирования Simulink – самое популярное расширение MATLAB. Пакет Simulink предназначен для математического моделирования линейных и нелинейных динамических систем и устройств, представленных своей функциональной блок-схемой (моделью).

Simulink основывается на принципе визуального программирования, в соответствии с которым пользователь создает модель системы в виде структурной схемы из библиотеки стандартных блоков. Таким образом, пользователю нет необходимости изучать язык программирования и численные методы. При моделировании система выполняет необходимые вычисления в соответствии с заданными настройками и выдает результаты в виде графиков и таблиц.

Запуск пакета Simulink из MATLAB можно сделать одним из двух способов:

– в окне ввода команд **Command Window** в строке ввода (справа от знака >>) набрать **simulink** и нажать клавишу **Enter**;

– на панели инструментов MATLAB левой клавишей мыши нажать кнопку , расположенную слева кнопки справки .


В результате этого откроется **Simulink Library Browser** – окно интегрированного обозревателя (браузера) библиотеки стандартных блоков Simulink (показано на рис. 2). В данном окне содержится дерево компонентов библиотеки блоков Simulink.

Библиотека блоков включает следующие основные разделы:

- **Continuous** – линейные непрерывные блоки;
- **Discontinuities** – нелинейные блоки;
- **Discrete** – дискретные блоки;
- **Math operations** – блоки математических операций;
- **Signal routing** – блоки преобразования сигналов;
- **Sinks** – регистрирующие блоки (приемники сигналов);
- **Sources** – источники сигналов.

Для просмотра того или иного раздела библиотеки достаточно выделить его мышью – в правой части окна **Simulink Library Browser** появится набор пиктограмм блоков активного раздела библиотеки.

Для *создания новой модели* необходимо в меню окна **Simulink Library Browser** выполнить команду **File→New→Model**, или же

нажать на клавиатуре комбинацию клавиш **Ctrl+N**, или же левой клавишей мыши на панели инструментов окна **Simulink Library Browser** нажать кнопку . В результате этого на экране появится новое чистое окно редактирования графической модели моделируемой системы или устройства.

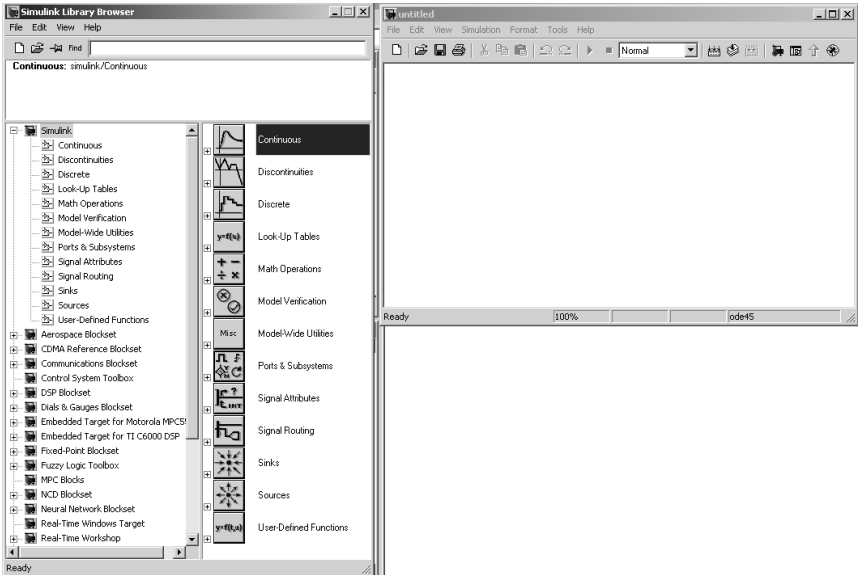


Рис. 2. Окно браузера библиотек Simulink

Запустите пакет Simulink, откройте окно создания новой модели. Создайте в Simulink модель системы, состоящей из рассматриваемого звена, источника ступенчатого сигнала и осциллографа (рис. 3).

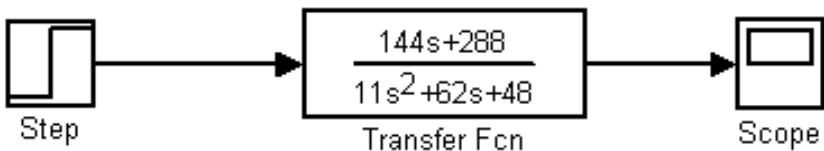


Рис. 3. Схема модели в окне Simulink

В окне **Simulink Library Brouser** в библиотеке **Simulink** на вкладке **Sources** найдите пиктограмму блока **Step** (Генератор ступенчатого сигнала), выделите его левой клавишей мыши и, не отпуская ее, перетащите данный компонент в окно редактирования модели (или выделите пиктограмму и затем в окне браузера выполните действие в меню **Edit/Add to the current model**).

В окне **Simulink Library Brouser** в библиотеке **Simulink** на вкладке **Sinks** найдите блок **Scope** (Осциллограф) и перетащите в окно модели.

В окне **Simulink Library Brouser** в библиотеке **Simulink** на вкладке **Continuous** найдите блок **Transfer Fcn** (Звено, заданное передаточной функцией) и перетащите его в окно модели.

Двойным щелчком на пиктограмме откройте окно параметров блока **Transfer Fcn** и введите коэффициенты заданной передаточной функции (рис. 4).

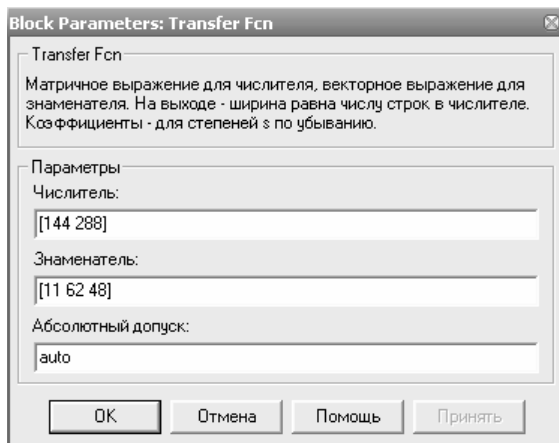



Рис. 4. Ввод параметров передаточной функции

Для завершения создания схемы соедините выход блока **Step** со входом объекта (нажмите левой клавишей мыши на значок **>** выхода блока **Step** и протяните до значка **>** входа блока **Transfer Fcn**), а выход объекта – со входом блока **Scope** (аналогично).

Получите реакцию рассматриваемого звена на единичное ступенчатое воздействие.

В меню окна редактирования модели выберите пункт **Simulation**→**Simulation parameters** (Параметры моделирования). В появившемся окне задания параметров моделирования на вкладке **Solver** в поле **Stop time** (время окончания моделирования, вводится в секундах) введите значение 100 (после проведения моделирования это значение может быть уточнено), а на вкладке **Workspace I/O** отключите флажок **Limit data point to last**.

В окне осциллографа в меню быстрого доступа по нажатию на кнопку **Parameters**  (справа от значка принтера) в появившемся окне параметров осциллографа на вкладке **Data history** отключите флажок **Limit data point to last**.

В меню окна редактирования модели выберите пункт **Simulation**→**Start**, в результате чего начнется процесс моделирования. Для прерывания процесса моделирования при выполнении тех или иных условий используется блок **Stop Simulation**, срабатывающий при поступлении на его вход ненулевого сигнала.

Результатом моделирования является график изменения выходного сигнала, отображаемый в окне осциллографа. Окно для наблюдения за сигналами (окно осциллограммы) открывается двойным щелчком по элементу, что возможно на любой фазе моделирования.

Для *сохранения результатов моделирования* в рабочем пространстве MATLAB используется блок **To Workspace** (Рабочее пространство) вкладки **Sinks**. После этого можно редактировать полученные графики или сохранять их в формате графического файла.

Перенесите результаты моделирования в MATLAB и получите график переходной функции.

Удалите линию соединения с блоком **Scope**. В окне **Simulink Library Browser** в библиотеке **Simulink** на вкладке **Sinks** найдите блок **To Workspace** и перетащите его в окно модели. Соедините выход объекта – со входом блока **To Workspace** (рис. 5).

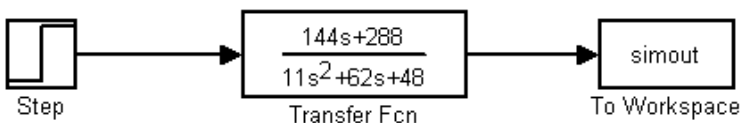


Рис. 5. Измененная схема модели в окне Simulink

После двойного щелчка мыши по пиктограмме блока **To Workspace** в открывшемся окне параметров (рис. 6) в соответствующих полях укажите имя выводимой переменной (например, `simout`) и формат данных `Array` (Массив).

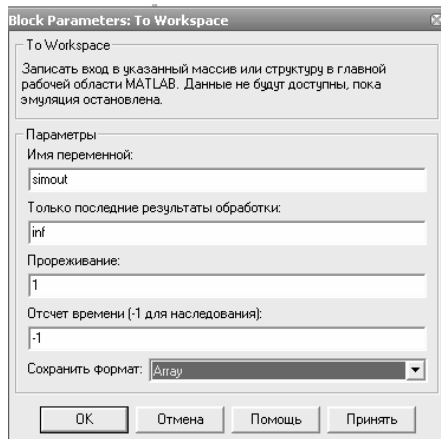


Рис. 6. Окно параметров блока **To Workspace**

Запустите процесс моделирования. Результат будет записан в рабочую область MATLAB.

Далее в командном окне MATLAB вызовите команду построения графиков:

```
>>plot(simout)
```

Выполните создание схемы и моделирование, взяв в качестве источника сигнала блок **Sine Wave** (вкладка **Sources** в библиотеке Simulink) (самостоятельно).

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Результаты решения уравнений $x^3 = -8$, $2x^2 + 3x - 5$, $x^2 - 5$.
3. Нули и полюса передаточной функции.
4. Графики переходной, импульсной переходной и частотных характеристик рассматриваемого звена.
5. Схемы моделей в Simulink и графиков их переходных функций.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Приведите команды для решения уравнения, заданного в вашем варианте, двумя способами, найдите точные и приближенные выражения для корней.

2. Приведите команду ввода в MATLAB вектора (по вариантам).

3. Приведите команду ввода в MATLAB передаточной функции $W(s)$ (по вариантам). Какие команды используются для построения переходной характеристики и АФЧХ этого звена?

4. Начертите графики двух функций $y_1 = x$ и $y_2 = 2(1 + e^{-x})$ в одном окне с подходящим масштабом ($0 \leq x \leq 1000$). Оформление графиков функций выполните в соответствии с вариантом.

Исходные данные по вариантам

Вариант	1	2	3	4	5
Уравнения	$x^3 = -12$	$x^3 = -27$	$x^3 = -8$	$x^3 = 64$	$x^3 = 10$
Векторы	$\begin{bmatrix} -3.5 \\ -4.2 \\ 5.6 \\ 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4 \\ -3 \\ 8.3 \\ 6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 33 \\ 44 \\ 66 \\ 6.2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.5 \\ 4 \\ 5.5 \\ 6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.5 \\ 4 \\ -5 \\ 6 \end{bmatrix}$
Переда- точные функции $W(s)$	$\frac{20}{s^2 + 30s + 50}$	$\frac{3}{s^2 + s + 6}$	$\frac{20}{s^2 + 4s + 2}$	$\frac{1}{s^2 + 6}$	$\frac{2}{s^2 + 4}$
График первой функции	Отдельные голубые квадраты	Пунктирная зеленая линия	Отдельные зеленые кружки	Сплошная зеленая линия	Отдельные желтые ромбы
График второй функции	Штриховая синяя линия	Отдельные красные звездочки	Пунктирная синяя линия	Отдельные красные ромбы	Сплошная черная линия

Лабораторная работа № 2
**ИЗУЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ
И МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ**

Цель работы: освоить методики получения математического описания и статических характеристик трех основных видов линейных звеньев: пропорционального (безынерционного) звена, апериодического звена первого порядка (инерционного) и звена (чистого) запаздывания.

Задание:

1. Изучить математическое описание линейных звеньев.
2. Получить экспериментальную статическую характеристику пропорционального звена путем моделирования.
3. Рассчитать теоретическую статическую характеристику пропорционального звена.
4. Построить полученные статические характеристики в одних координатах.
5. Сделать выводы о соответствии полученных экспериментальной и теоретической статических характеристик пропорционального звена.
6. Повторить пункты 2–5 для апериодического звена первого порядка.
7. Повторить пункты 2–5 для звена чистого запаздывания.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Работа выполняется на персональных ЭВМ с использованием системы компьютерных расчетов MATLAB и входящего в ее состав пакета компьютерного моделирования Simulink.

Выполнение работы

1. Математическое описание линейных звеньев

Теория автоматического управления рассматривает технические объекты вне зависимости от их физической природы (механические, электромеханические, тепловые, химико-технологические и т. п.) и при изучении процессов управления вместо реальных элементов рассматривает их адекватные математические модели.

Звено – простейший элемент системы управления.

Звено направленного действия – звено, передающее сигнал только в одном направлении – со входа на выход. Входной сигнал звена может изменяться с течением времени и обозначается $x(t)$, выходной сигнал звена также зависит от времени и обозначается $y(t)$.

Динамическим звеном называется часть системы управления, описываемая дифференциальным (или иным) уравнением определенного вида.

Линейным звеном называется звено, описываемое *линейным* дифференциальным (или иным) уравнением.

Математическое описание звена представляет собой уравнение, связывающее входной и выходной сигналы звена.

Получить математическое описание элемента (звена, системы) можно *теоретическим* способом – исходя из законов физики (закон сохранения энергии, массы, импульса, законы Кирхгофа и т. д.). Полученные таким образом математические модели описывают внутренние связи в объекте и, как правило, наиболее точны.

Для удобства проектирования, анализа систем все многообразие элементарных звеньев разбивают на группы – типовые виды динамических звеньев. Звенья одной группы описываются одинаковыми (дифференциальными) уравнениями.

Простейшие типовые звенья

Пропорциональное (усилительное, безынерционное) звено усиливает входной сигнал в K раз (K – коэффициент усиления).
Уравнение звена

$$y(t) = Kx(t). \quad (1)$$

Пример усилительного звена – механические передачи, усилители.

Апериодическое (инерционное) звено первого порядка.
Уравнение звена

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t), \quad (2)$$

где T – постоянная времени, с;

K – коэффициент преобразования (усиления).

Пример апериодического звена первого порядка – RC-цепочка, датчики.

Запаздывающее звено (звено чистого запаздывания). Выходная величина повторяет входную величину с некоторым запаздыванием. Уравнение звена

$$y(t) = x(t - \tau), \quad (3)$$

где τ – время запаздывания, с.

Пример – ленточный транспортер, конвейер.

Выходной сигнал звена в реальных условиях, очевидно, существенно зависит от формы входного сигнала $x = x(t)$. При анализе работы звеньев принято использовать так называемые **типовые входные воздействия** , которые являются математическими моделями часто встречающихся реальных воздействий:

– **единичное ступенчатое воздействие (функция Хевисайда)**, обозначаемое следующим образом:

$$1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0, \\ 1, & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Следует заметить, что ступенчатый сигнал можно получить на практике. Например, включение в некоторый момент времени в помещении электронагревателя на некоторую постоянную мощность можно рассматривать как ступенчатое управляющее воздействие на объект управления (помещение). Подача постоянного электрического напряжения на вход электродвигателя постоянного тока путем замыкания идеального электрического ключа также представляет собой ступенчатое воздействие;

– **импульсное воздействие (дельта-функция, функция Дирака)**:

$$x(t) = \delta(t) = \begin{cases} \infty, & \text{при } t = 0, \\ 0, & \text{при } t \neq 0, \end{cases} \quad (5)$$

при этом, согласно определению:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1. \quad (6)$$

Это идеальный сигнал, который равен нулю во всех точках, кроме $t = 0$, где он уходит в бесконечность, причем его площадь (интеграл по всей оси времени) равна единице.

Дельта-функция связана с единичным ступенчатым воздействием выражением

$$\delta(t) = 1'(t), \quad (7)$$

т. е. дельта-функция равна производной от ступенчатого воздействия;
– **гармоническое воздействие:**

$$x(t) = A_x \sin(\omega t), \quad (8)$$

где A_x – амплитуда;

ω – круговая частота, рад/с.

Временные характеристики звена

Переходная функция звена $h(t)$ – реакция звена на единичное ступенчатое воздействие. На рис. 7 показан типовой вид переходной характеристики апериодического звена первого порядка.

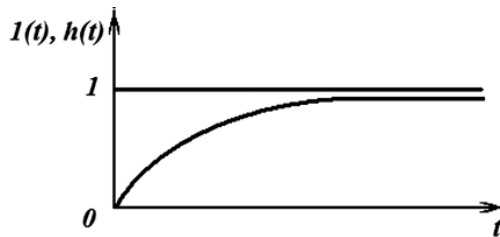


Рис. 7. Единичное ступенчатое входное воздействие и соответствующая ему переходная функция апериодического звена первого порядка

Ступенчатый сигнал легко получить на практике, поэтому переходную функцию звена можно получить экспериментально.

Импульсная переходная функция $w(t)$ – реакция звена на импульсное воздействие (дельта-функцию). Импульсная переходная функция линейного звена связана с его переходной функцией выражением

$$w(t) = h'(t). \quad (9)$$

Режимы работы звеньев

В теории автоматического управления принято выделять два режима работы элементов и систем автоматики: статический и динамический.

Статическим (установившимся) называется такой режим работы, при котором входная и выходная величины данного элемента неизменны во времени, т. е. $x(t) = \text{const}$ и $y(t) = \text{const}$.

Динамическим режимом работы (переходным процессом) называется режим работы элементов (систем) автоматики при изменяющихся во времени входном воздействии и выходной величине, т. е. при $x = x(t)$ и $y = y(t)$.

Поведение звеньев (систем) автоматики в реальных условиях представляет собой *сочетание переходного и установившегося режимов*. После окончания переходного процесса звено приходит к статическому режиму работы (рис. 8).

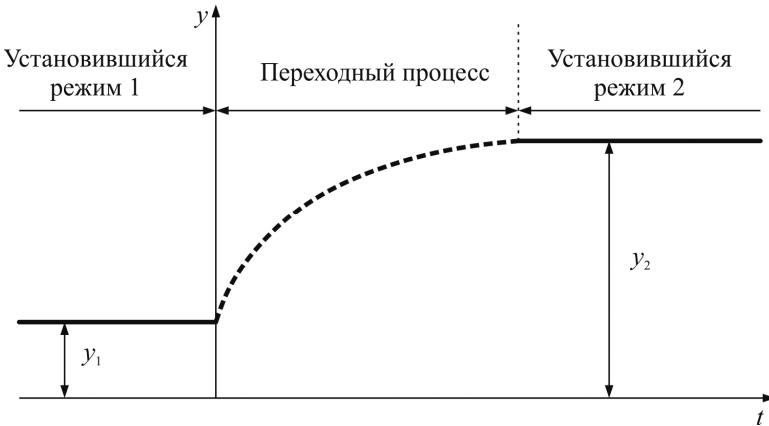


Рис. 8. Переход от одного установившегося режима к другому

Статической характеристикой звена (системы) называется зависимость между *постоянным* входным воздействием и *постоянной* выходной величиной звена (системы) в установившемся режиме (после окончания переходного процесса).

Статическая характеристика обычно изображается графически в плоскости координат (x, y) .

Статическая характеристика полностью характеризует поведение динамического звена в установившемся режиме.

Статические характеристики простейших типовых звеньев:

– пропорциональное (усилительное, безынерционное) звено:

$$y = Kx;$$

– аperiodическое (инерционное) звено первого порядка:

$$y = Kx;$$

– запаздывающее звено (звено чистого запаздывания):

$$y = x.$$

2. Получение экспериментальной статической характеристики пропорционального (безынерционного) звена путем моделирования

В качестве исследуемого звена рассмотрим следующий делитель напряжения (рис. 9).

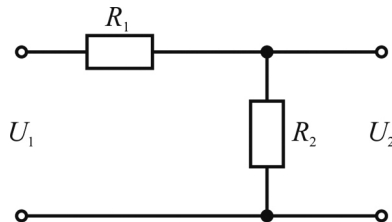


Рис. 9. Исследуемая схема пропорционального звена:
 U_1 – входное воздействие, U_2 – выходная величина

Создайте схему исследуемого пропорционального звена в Simulink. Запустите систему компьютерного моделирования MATLAB и пакет Simulink. Откройте окно создания новой модели (см. выполнение лабораторной работы № 1).

В открывшемся окне создайте графическую модель заданной электрической цепи (приблизительный вид показан на рис. 10).

1) Сопrotивление R_1 . В окне Simulink Library Browser в библиотеке SimPowerSystems на вкладке Elements (Элементы) найдите блок Series RLC Branch, выделите его левой клавишей мыши и, не отпуская ее, перетащите данный компонент в окно

редактирования модели. Данный блок представляет собой последовательное соединение активного сопротивления R , индуктивности L и емкости C , однако, задав соответствующие параметры блока, можно моделировать каждый из этих трех элементов в отдельности. Необходимо задать параметры блока. Для этого левой клавишей мыши следует дважды щелкнуть по нему. В появившемся окне **Block Parameters: Series RLC Branch** введите следующие значения параметров: для параметра Resistance R (Ohms) значение сопротивления R_1 (по вариантам); для параметра Inductance L (H) – нулевое значение индуктивности 0; для параметра Capacitance C (F) – значение электрической емкости inf, равное бесконечности.

Нажатием кнопок Apply и OK закрепите введенные параметры блока. В результате значок блока изменится и примет вид, соответствующий только одному активному сопротивлению. Название блока по умолчанию автоматически задано как **Series RLC Branch** и отображается под ним. Для задания названия блока щелкните левой клавишей мыши по надписи **Series RLC Branch**, войдите в строку редактирования надписи и замените надпись **Series RLC Branch** на **R1**; выход из строки редактирования надписи осуществляется щелчком левой клавишей мыши на свободном пространстве окна модели.

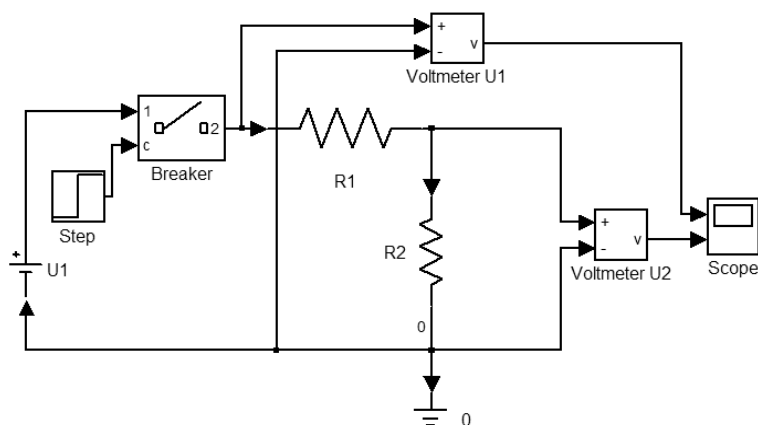


Рис. 10. Схема для получения статической характеристики пропорционального звена в Simulink

2) Сопротивление R_2 задается аналогично. Далее, для поворота значка сопротивления, чтобы он располагался вертикально, необходимо щелкнуть по нему один раз правой клавишей мыши и в появившемся всплывающем меню выбрать пункт **Format**→**→Rotate block**.

3) Соедините блоки **R1** и **R2**. Подведите курсор мыши к выходу блока **R1** и, нажав левую клавишу мыши, соедините выход **R1** с входом блока **R2**.

4) Вольтметр для измерения выходного напряжения. На вкладке **Measurements** (Измерители) в библиотеке **SimPowerSystems** в окне **Simulink Library Browser** выберите блок **Voltage Measurement** (Блок измерения напряжения) и перетащите его в окно модели. Начальное название элемента измените на **Voltmeter U2**. Вход «-» вольтметра соедините с выходом блока **R2**. Затем подведите курсор мыши к входу «+» вольтметра и, нажав левую клавишу мыши, соедините его с линией соединения блоков **R1** и **R2**.

5) Источник постоянного напряжения. Для подачи постоянного напряжения на вход звена следует использовать источник постоянного напряжения и выключатель.

На вкладке **Electrical Sources** в библиотеке **SimPowerSystems** в окне **Simulink Library Browser** выберите блок **DC Voltage Source** (Источник постоянного напряжения) и перетащите его в окно модели. Название блока **DC Voltage Source** измените на **U1**. Вход блока **U1** соедините с линией соединения блоков **R1** и **Voltmeter U2**.

6) Для замыкания электрической цепи используется блок **Breaker** (Выключатель) на вкладке **Elements** в библиотеке **SimPowerSystems** в окне **Simulink Library Browser**. Данный элемент моделирует устройство включения и выключения тока. Выключатель **Breaker** может управляться внешним управляющим сигналом, подаваемым на управляющий вход **c**. Замыкание входного и выходного контактов выключателя 1 и 2 выполняется при подаче на вход **c** единичного сигнала, а размыкание – при подаче нулевого сигнала. Устройство имеет встроенную искрогасящую **RC**-цепь, включенную параллельно контактам выключателя.

Перетащите блок **Breaker** в окно модели (название оставьте **Breaker**). Двойным щелчком левой клавишей мыши на значке


блока откройте окно задания его параметров и для параметра **Snubber resistance Rom (Ohms)** (Сопrotивление выключателя в разомкнутом состоянии) вместо значения 10^6 введите **inf** (бесконечность), после чего нажмите кнопки **Apply** и **OK**. Входной контакт выключателя 1 соедините с выходом источника напряжения **U1**, а выходной контакт 2 – со входом блока резистора **R1**.

7) Для замыкания выключателя используется блок **Step** на вкладке **Sources** в библиотеке **Simulink**. Данный блок моделирует ступенчатое изменение сигнала. Перетяните его левой клавишей мыши в окно модели и соедините с управляющим входом с выключателя. Выполните двойной щелчок левой клавишей мыши на блоке **Step** и откройте окно задания его параметров. В соответствии с заданными по умолчанию значениями параметров, сигнал на выходе блока будет изменяться от начального значения (**Initial value**) 0 до конечного значения (**Final value**) 1 в момент времени (**Step time**) 1 с от начала процесса моделирования. Оставьте все параметры блока **Step** без изменения и нажмите кнопку **OK**.

8) На соединительной линии блоков **U1** и **R2** щелкните правой клавишей мыши, во всплывающем окне выберите пункт **Signal Properties** и в появившемся окне в поле **Signal name** в качестве названия сигнала введите 0 (эта линия – нулевая – соответствует нулевому потенциалу).

После этого на вкладке **Connectors** в библиотеке **SimPowerSystems** в окне **Simulink Library Browser** выберите блок **Ground (input)** и перетащите его в окно редактирования модели. Щелкнув по нему правой клавишей мыши и выбрав пункт **Format→Show name** всплывающего меню, измените название с **Ground (input)** на 0. После этого вход блока 0 левой клавишей мыши соедините с нулевой линией.

9) Вольтметр для измерения входного напряжения. На вкладке **Measurements** в библиотеке **SimPowerSystems** в окне **Simulink Library Browser** выберите блок **Voltage Measurement** и перетащите его в окно модели. Начальное название элемента измените на **Voltmeter U1**. Вход «-» вольтметра соедините с нулевой линией. Вход блока «+» вольтметра, нажав левую клавишу мыши, соединим с линией соединения блоков **R1** и **Breaker**.

10) Осциллограф. На вкладке **Sinks** в библиотеке **Simulink** в окне **Simulink Library Browser** выберите блок **Scope** и перетащите его в окно модели (название оставьте **Scope**). Двойным щелчком левой клавишей мыши на значке блока **Scope** откройте окно **Scope**, моделирующее экран реального осциллографа (рис. 11). В окне осциллографа в меню быстрого доступа нажмите кнопку **Parameters**  (справа от значка принтера) и в появившемся окне параметров осциллографа в графе **Number of Axes** поставьте значение 2, а на вкладке **Data history** отключите флажок **Limit data point to last**. Нажмите кнопки **Apply** и **OK**.

Теперь блок **Scope** имеет два входа. Выходы блоков **Voltmeter U1** и **Voltmeter U2** соедините соответственно с верхним и нижним входами блока **Scope**.

Сохраните созданную модель (например, под именем **const_voltage_prop.mdl**) на жесткий диск в рабочую папку, выбрав в меню окна редактирования модели пункт **File**→**Save as...**

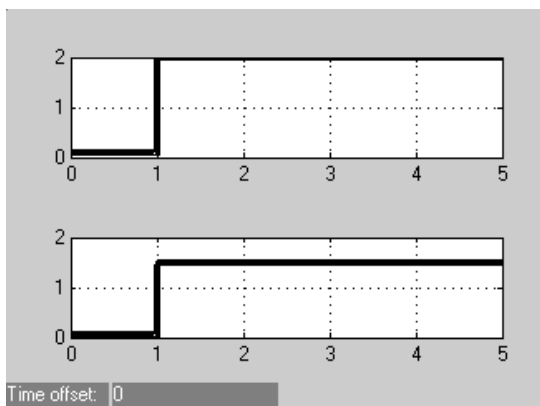


Рис. 11. Определение установившегося выходного значения напряжения по экрану осциллографа

Выполните моделирование схемы. Для этого сначала задайте значение постоянного напряжения U_1 , подаваемого на вход цепи. Двойным щелчком левой кнопкой мыши на блоке источника напряжения **U1** откройте окно задания его параметров

и в поле для параметра **Amplitude (V)** – напряжение источника в вольтах – введите значение 2. Подтвердите ввод нажатием кнопок **Apply** и **OK**.

В меню окна редактирования модели выберите пункт **Simulation**→**Simulation parameters**, в появившемся окне задания параметров моделирования на вкладке **Solver** в поле **Stop time** введите значение 5, а на вкладке **Workspace I/O** отключите флажок **Limit data point to last**. Нажмем кнопки **Apply** и **OK**.

В меню окна редактирования модели выберите пункт **Simulation**→**Start**, в результате чего начнется процесс моделирования.

При этом на экране появится *предупреждающее сообщение* о том, что созданная модель содержит нелинейные элементы (это относится к блоку выключателя **Breaker**), поэтому для корректного моделирования необходимо использовать компьютерные методы решения дифференциальных уравнений «ode23tb» или «ode15s». Таким образом Simulink запрашивает на это разрешение пользователя. Следует нажать кнопку **OK**.

Результатом моделирования являются графики изменения напряжений U_1 на входе цепи и U_2 на выходе цепи, отображаемые соответственно в верхнем и нижнем окнах осциллографа (рис. 11). Как видно из графиков, в момент времени $t = 1$ с от начала моделирования замыкается выключатель и постоянное входное напряжение 2 В подается на вход электрической цепи. В этот момент входное напряжение меняется на заданное (2 В). В этот же момент в цепи устанавливается постоянное значение выходного напряжения U_2 , отличное по величине от U_1 . Таким образом, выходной сигнал рассматриваемого пропорционального звена полностью повторяет входной сигнал по форме, но отличается от него по значению.

Для определения величины выходного напряжения по экрану осциллографа можно воспользоваться экранной лупой по оси Y .

Проведите компьютерное моделирование схемы, изменяя значения постоянного входного напряжения U_1 от -6 до $+6$ В с шагом 2 В. Для каждого значения U_1 определите соответствующее установившееся значение выходного напряжения U_2 . Данные опытов внесите в строку U_{23} табл. 2.

Результаты измерений и расчетов для построения экспериментальной и теоретической статической характеристики звена

$U_1, \text{В}$	-6	-4	-2	0	2	4	6
$U_{2Э}, \text{В}$							
$K_{Э}$							
$K_{Т}$							
$U_{2Т}, \text{В}$							

Рассчитайте значение коэффициента передачи по формуле

$$K = \Delta U_2 / \Delta U_1, \quad (10)$$

где $\Delta U_2 = U_{2\max} - U_{2\min}$, $\Delta U_1 = U_{1\max} - U_{1\min}$ – разность между максимальным и минимальным измеренными значениями соответственно выходного и входного напряжений. Полученное значение внесите в строку $K_{Э}$ табл. 2.

3. Расчет теоретической статической характеристики пропорционального звена

Вывод уравнения звена. В нашем случае необходимо найти зависимость U_2 от U_1 . Для этого воспользуемся законом Ома:

$$\begin{cases} U_1(t) = (R_1 + R_2)I(t), \\ U_2(t) = R_2I(t), \end{cases}$$

где $I(t)$ – значение силы тока в цепи.

Разделив почленно второе уравнение на первое и сократив, получим

$$\frac{U_2(t)}{U_1(t)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

откуда

$$U_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1(t).$$

В теории автоматического управления принято в уравнениях входные переменные располагать в левой части, а выходные – в правой части уравнения. Кроме того, принято преобразовывать уравнение так, чтобы коэффициент при самой выходной величине (в нашем случае U_2) был равен 1.

Постоянный коэффициент при входной величине U_1 обозначим

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = K. \quad (12)$$

Окончательно получим

$$U_2(t) = K U_1(t). \quad (13)$$

Статическая характеристика рассматриваемого звена:

$$U_2 = K U_1. \quad (14)$$

Рассчитайте теоретический коэффициент передачи звена K_T по формуле (12) и внесите в строку K_T табл. 2.

Рассчитайте расчетные значения U_{2T} по теоретической формуле статической характеристики (14) для следующих значений постоянного входного напряжения U_1 , В: $-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6$. Результаты внесите в строку U_{2T} табл. 2.

4. Построение полученных статических характеристик пропорционального звена

Постройте экспериментальную статическую характеристику $U_{2э} = f(U_1)$ пропорционального звена по результатам моделирования.

Постройте теоретическую статическую характеристику $U_{2T} = K_T U_1$ пропорционального звена в одних координатах с экспериментальной.

5. Выводы о соответствии полученных экспериментальной и теоретической статических характеристик пропорционального звена

Запишите полученные формулы экспериментальной и теоретической статических характеристик пропорционального звена, подставив значения коэффициентов усиления из табл. 2. Сделайте

выводы о соответствии экспериментальной и расчетной статистических характеристик друг другу.

6. Получение экспериментальной и теоретической статических характеристик аperiodического звена первого порядка (инерционного)

Получение экспериментальной статической характеристики аperiodического звена первого порядка

В качестве исследуемого звена рассмотрим следующий электрический RC-фильтр (рис. 12).

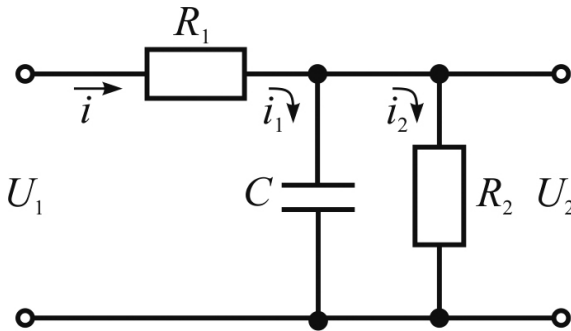


Рис. 12. Исследуемая схема аperiodического звена первого порядка:
 U_1 – входное воздействие, U_2 – выходная величина

Создайте схему исследуемого аperiodического звена первого порядка в Simulink.

Внесите следующие изменения в модель `const_voltage_prop`, созданную при получении статической характеристики пропорционального звена: в окне Simulink Library Browser в библиотеке SimPowerSystems на вкладке Elements найдите блок Series RLC Branch, выделите его левой клавишей мыши и, не отпуская ее, перетащите данный компонент в окно редактирования модели, расположив левее элемента $R2$. Левой клавишей мыши выполните двойной щелчок по элементу Series RLC Branch и в появившемся окне Block Parameters: Series RLC Branch введите следующие значения параметров: для параметра Resistance R (Ohms) – нулевое значение сопротивления 0;

для параметра Inductance L (H) – нулевое значение индуктивности 0; для параметра Capacitance C (F) – значение электрической емкости C (по вариантам). Нажатием кнопок Apply и OK закрепите введенные параметры блока. В результате значок блока изменится и примет вид, соответствующий только одному конденсатору. Для поворота значка конденсатора, чтобы он располагался вертикально, необходимо щелкнуть по нему один раз правой клавишей мыши и в появившемся всплывающем меню выбрать пункт Format→Rotate block, затем Format→Flip block. При необходимости растяните значок, выделив его левой клавишей мыши и потянув за угловой квадрат.

Чтобы задать название блока, щелкните левой клавишей мыши по надписи Series RLC Branch, войдите в строку редактирования надписи и замените надпись Series RLC Branch на C . Выход из строки редактирования надписи осуществляется щелчком левой клавишей мыши на свободном пространстве окна модели.

Далее выполним включение блока C в исследуемую схему. Вначале выделите линию, соединяющую блок R1 и блок Voltmeter U2 и удалите ее, нажав клавишу Delete.

Для соединения входа блока C необходимо использовать блок T connector, расположенный на вкладке Connectors в библиотеке SimPowerSystems в окне Simulink Library Browser. Перетащим его левой клавишей мыши в окно редактирования модели const_voltage_prop, расположив правее блока R1 над блоком C . Далее щелкнем по нему правой клавишей мыши и во всплывающем меню выберем пункт Format→Show name, в результате над значком элемента появится его название T connector, заданное автоматически. Измените название блока с T connector на Unit 1. Далее подведите курсор мыши к выходу блока R1 и, нажав левую клавишу мыши, соедините выход с левым входом блока Unit 1. Выход блока C аналогичным образом соедините с нижним входом блока Unit 1, выход блока Unit 1 – со входом вольтметра Voltmeter U2, вход блока C – с нулевой линией.

Сохраните созданную модель под новым именем (например, под именем const_voltage_a1p.mdl) в рабочую папку, выбрав в меню окна редактирования модели пункт File→Save as...

Приблизительный вид создаваемой схемы показан на рис. 13.

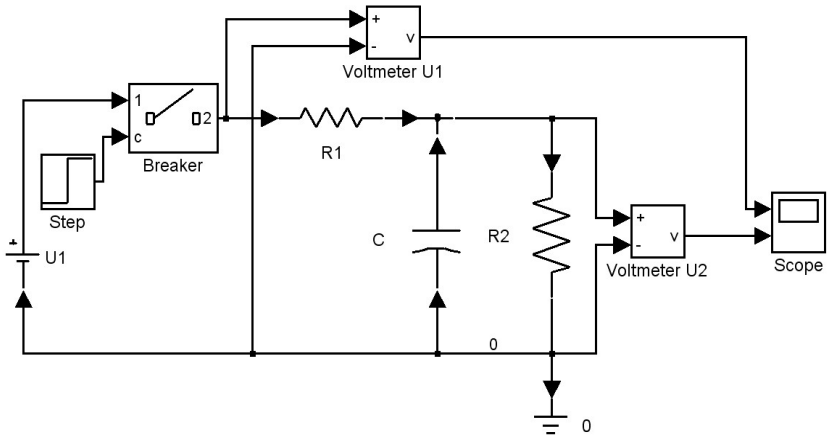


Рис. 13. Схема для получения статической характеристики аperiodического звена первого порядка в Simulink

Выполните моделирование схемы так же, как и при изучении пропорционального звена, задав значение постоянного входного напряжения U_1 , равное 2 В, и время моделирования, равное 100 с. Результирующие графики изменения входного и выходного напряжений для определения установившегося значения имеют вид, показанный на рис. 14.

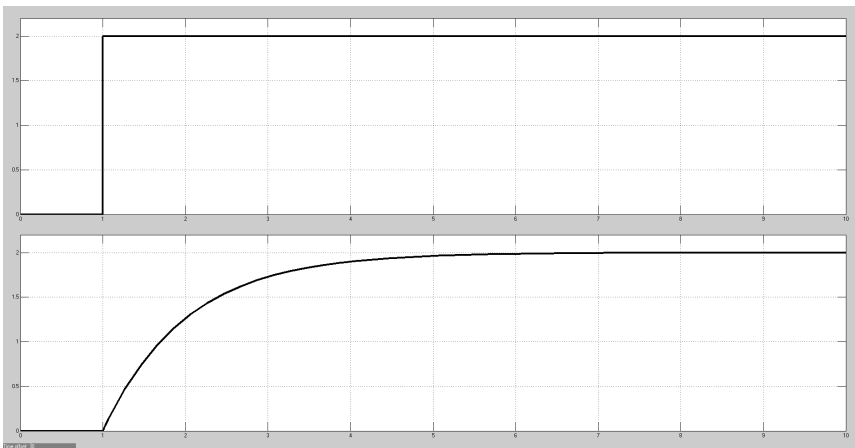


Рис. 14. Графики изменения входного и выходного напряжений для аperiodического звена первого порядка

Как видно из графика, замыкание выключателя в момент времени $t = 1$ с от начала моделирования приводит к подаче на вход электрической цепи постоянного входного напряжения 2 В. В цепи начинается переходный процесс, отражающийся в нижнем окне осциллографа, после окончания которого устанавливается постоянное значение выходного напряжения U_2 (в примере на рис. 14 эта величина равна 2 В).

Для определения величины выходного напряжения по экрану осциллографа можно воспользоваться экранной лупой по оси Y .

Проведите компьютерное моделирование схемы, изменяя значения постоянного входного напряжения U_1 от -6 до $+6$ В с шагом 2 В. Для каждого значения U_1 определите соответствующее установившееся значение выходного напряжения U_2 . Постройте таблицу, аналогичную табл. 2. Данные опытов внесите в строку U_{23} таблицы.

Рассчитайте значение коэффициента передачи по формуле (10). Полученное значение внесите в строку K_3 таблицы.

Получение теоретической статической характеристики апериодического звена первого порядка

Вывод уравнения звена. В нашем примере необходимо найти зависимость U_2 от U_1 . Поскольку сила тока через конденсатор не постоянна по времени, для напряжения на конденсаторе получаем

$$U_2 = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t i_1(t) dt,$$

откуда

$$\frac{dU_2}{dt} = \frac{1}{C} i_1(t),$$

следовательно,

$$i_1(t) = C \frac{dU_2}{dt}.$$

С другой стороны, учитывая $i(t) = i_1(t) + i_2(t)$, получаем

$$\begin{aligned}
 U_1 &= U_2 + U_{R_1} = i(t)R_1 + U_2 = (i_1(t) + i_2(t))R_1 + U_2 = \\
 &= \left(C \frac{dU_2}{dt} + \frac{U_2}{R_2} \right) R_1 + U_2 = CR_1 \frac{dU_2}{dt} + U_2 \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right),
 \end{aligned}$$

где U_{R_1} и U_2 – падение напряжений на сопротивлении R_1 и емкости C .

Получаем искомое математическое описание заданного звена:

$$\frac{C R_1 R_2}{R_1 + R_2} \frac{dU_2(t)}{dt} + U_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1(t). \quad (15)$$

Постоянный коэффициент при первой производной $\frac{dU_2}{dt}$, имеющий размерность [с], обозначим

$$\frac{C R_1 R_2}{R_1 + R_2} = T; \quad (16)$$

коэффициент при входной величине U обозначим

$$K = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (17)$$

Окончательно получим

$$T \frac{dU_2(t)}{dt} + U_2(t) = K U_1(t). \quad (18)$$

Коэффициенты при производных выходной величины называют **постоянными времени** (в нашем случае это T). Они имеют размерность времени. Коэффициенты при входной величине (в нашем случае K) называют **коэффициентами передачи**.

Расчет статической характеристики звена. В статическом режиме после завершения переходного процесса сигналы U_1 и U_2 постоянны и не зависят от t , т. е. производная $dU_1/dt = 0$. Таким образом, приравняв нулю производную $dU_2/dt = 0$ в уравнении (18), получим статическую характеристику рассматриваемого звена:

$$U_2 = K U_1. \quad (19)$$

Внесите теоретический коэффициент передачи аperiodического звена первого порядка K_T из формулы (17) в строку K_T таблицы.

Рассчитайте расчетные значения U_{2T} по теоретической формуле (19) статической характеристики для следующих значений постоянного входного напряжения U_1 , В: -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6. Результаты внесите в строку U_{2T} таблицы.

Постройте экспериментальную статическую характеристику $U_{2Э} = f(U_1)$ аperiodического звена первого порядка по результатам моделирования.

Постройте теоретическую статическую характеристику $U_{2T} = K_T U_1$ аperiodического звена первого порядка в одних координатах с экспериментальной.

Запишите полученные формулы экспериментальной и теоретической статических характеристик аperiodического звена первого порядка, подставив значения коэффициентов усиления из таблицы. Сделайте выводы о соответствии экспериментальной и расчетной статических характеристик друг другу.

7. Получение экспериментальной и теоретической статических характеристик звена чистого запаздывания

Получение экспериментальной статической характеристики звена чистого запаздывания

В качестве примера исследуемого звена рассмотрим трубу с вентилятором (рис. 15).

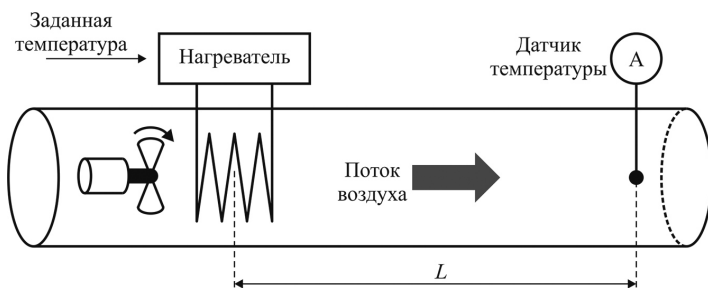



Рис. 15. Пример звена запаздывания

Создайте схему исследуемого звена запаздывания в Simulink. Запустите систему компьютерного моделирования MATLAB,

выполните запуск пакета Simulink и откройте окно создания новой модели (см. выполнение лабораторной работы № 1).

В окне Simulink Library Browser в библиотеке Simulink на вкладке Sources найдите пиктограмму блока Step, выделите его левой клавишей мыши и, не отпуская ее, перетащите данный компонент в окно редактирования модели.

Далее в окне Simulink Library Browser в библиотеке Simulink на вкладке Sinks найдите блок Scope и перетащите его в окно модели (название блока оставьте Scope). Двойным щелчком левой клавишей мыши на значке блока Scope откройте окно осциллографа Scope, в меню быстрого доступа нажмите кнопку

Parameters  (справа от значка принтера) и в появившемся окне параметров осциллографа в графе Number of Axes поставьте значение 2, а на вкладке Data history отключите флажок Limit data point to last. Нажмите кнопки Apply и OK.

В окне Simulink Library Browser в библиотеке Simulink на вкладке Continuous отыщите блок Transport Delay (Звено запаздывания) и перетащите его в окно модели. Двойным щелчком на пиктограмме откройте окно параметров блока Transport Delay, где следует ввести значение временной задержки в соответствии с вариантом.

Соедините выход блока Step со входом звена запаздывания, а выход звена – с нижним входом блока Scope. Верхний вход блока Scope соедините с линией, соединяющей блоки Step и Transport Delay.

Сохраните созданную модель в рабочую папку на жесткий диск (например, под именем const_delay.mdl), выбрав в меню окна редактирования модели пункт File→Save as...

Вид создаваемой графической модели показан на рис. 16.

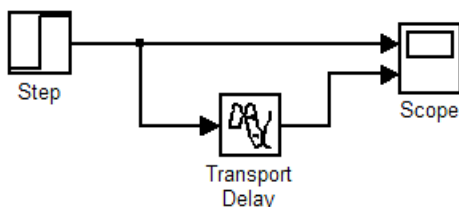


Рис. 16. Схема для получения статической характеристики звена запаздывания в Simulink

Выполните моделирование схемы, задав время моделирования 10 с.

Результирующие графики изменения значений входной и выходной величин для определения установившегося значения имеют вид, показанный на рис. 17.

Как видно из графиков, в момент времени $t = 1$ с от начала моделирования происходит подача единичного ступенчатого входного воздействия. В цепи начинается переходный процесс, отражающийся в нижнем окне осциллографа, после окончания которого устанавливается постоянное значение выходной величины. Таким образом, выходной сигнал рассматриваемого звена запаздывания полностью повторяет входной сигнал по форме и значению, но отстает от него на заданную величину запаздывания.

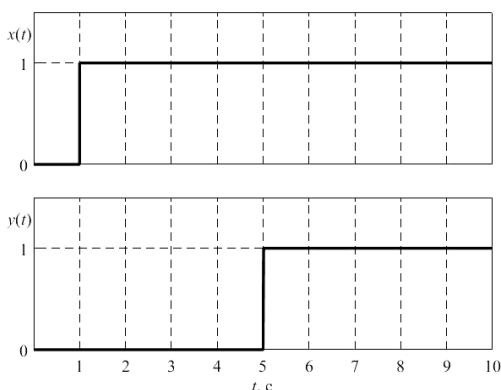


Рис. 17. Графики изменения значения входной и выходной величин звена запаздывания

Для определения величины выходного напряжения по экрану осциллографа можно воспользоваться экранной лупой по оси Y .

Проведите компьютерное моделирование схемы, изменяя значения постоянного входного напряжения U_1 от -6 до $+6$ В с шагом 2 В. При этом значения входной амплитуды следует задавать непосредственно в блоке Step в поле Final value. Для каждого значения U_1 определите соответствующее установившееся значение выходного напряжения U_2 . Постройте таблицу, аналогичную табл. 2, для исследования звена чистого запаздывания. Данные опытов внесите в строку U_{23} таблицы.

Рассчитайте значение коэффициента передачи по формуле (10).
Полученное значение внесите в строку K_3 таблицы.

Получение теоретической статической характеристики звена чистого запаздывания

Уравнение звена имеет вид

$$y(t) = x(t - \tau), \quad (20)$$

где τ – величина запаздывания, которая в рассматриваемом примере зависит от геометрических параметров трубопровода, с.

Имеем

$$\tau = \frac{L}{v}, \quad (21)$$

где L – длина трубопровода, м;

v – скорость потока воздуха в трубе, м/с.

Расчет статической характеристики звена. В статическом режиме после завершения переходного процесса сигналы y и x постоянны и не зависят от t . Статическая характеристика чистого запаздывания звена:

$$y = x. \quad (22)$$

Определите значение теоретического коэффициента K_T передачи звена чистого запаздывания из формулы (22) и внесите в соответствующую строку таблицы.

Рассчитайте теоретические значения U_{2T} по формуле (22) статической характеристики для следующих значений постоянного входного напряжения U_1 , В: -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6. Результаты внесите в строку U_{2T} таблицы.

Постройте экспериментальную статическую характеристику $U_{2Э} = f(U_1)$ звена чистого запаздывания по результатам моделирования.

Постройте теоретическую статическую характеристику $U_{2T} = K_T U_1$ звена чистого запаздывания в одних координатах с экспериментальной.

Запишите полученные формулы экспериментальной и теоретической статических характеристик звена чистого запаздывания, подставив значения коэффициентов усиления из таблицы. Сделайте выводы о соответствии экспериментальной и расчетной статических характеристик друг другу.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Результаты исследования пропорционального звена:
 - 1) данные для построения экспериментальной и теоретической статических характеристик (табл. 2);
 - 2) графики экспериментальной и теоретической статических характеристик;
 - 3) вывод о соответствии экспериментальной и теоретической статических характеристик друг другу.
3. Результаты исследования аperiodического звена первого порядка.
4. Результаты исследования звена чистого запаздывания.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение звена, линейного звена.
2. Перечислите типовые входные воздействия. Какие из них использовались при выполнении работы?
3. Какие режимы работы звеньев вы знаете? Поясните понятия: переходный и установившийся режим.
4. Дайте определение статической характеристики.
5. Изложите методику получения статических характеристик линейных звеньев теоретическим и экспериментальными методами.
6. Опишите полученные графики.

Исходные данные по вариантам

Вариант	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C, \text{ Ф}$	$\tau, \text{ с}$
1	1000	1000	0,001	3
2	1000	2000	0,001	4
3	1000	3000	0,001	5
4	1000	4000	0,001	6
5	1000	5000	0,001	7

Лабораторная работа № 3
**ИЗУЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ
И МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ**

Цель работы: освоить методики получения частотных характеристик трех основных видов линейных звеньев: пропорционального (безынерционного) звена, апериодического звена первого порядка (инерционного) и звена (чистого) запаздывания.

Задание:

1. Изучить получение частотных характеристик линейных звеньев.
2. Получить экспериментальные частотные характеристики пропорционального звена путем моделирования.
3. Рассчитать теоретические частотные характеристики пропорционального звена.
4. Построить полученные частотные характеристики пропорционального звена.
5. Сделать выводы о соответствии полученных экспериментальных и теоретических частотных характеристик пропорционального звена.
6. Повторить пункты 2–5 для апериодического звена первого порядка.
7. Повторить пункты 2–5 для звена чистого запаздывания.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Работа выполняется на персональных ЭВМ с использованием системы компьютерных расчетов MATLAB и входящего в ее состав пакета компьютерного моделирования Simulink.

Выполнение работы

1. Частотные характеристики линейных звеньев

Если на линейное звено (систему) подать гармоническое воздействие вида (8), то после окончания переходного процесса на выходе звена установится также гармонический сигнал:

$$y(t) = A_y \sin(\omega t + \varphi), \quad (23)$$

где A_y – амплитуда выходного сигнала;

φ – разность фаз между выходным и входным сигналами, рад.

Физические свойства линейных звеньев (систем) таковы, что частота входного и выходного сигналов одинакова. Амплитуда выходного сигнала при постоянной амплитуде входного сигнала и разность фаз между выходным и входным сигналами зависят от частоты (рис. 18).

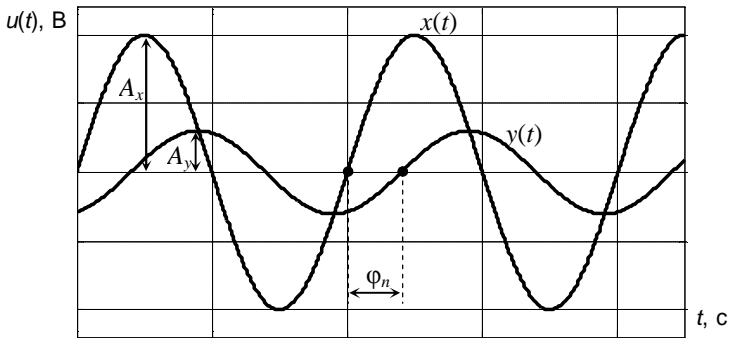


Рис. 18. Входной и выходной гармонические сигналы линейного звена

Амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) называется зависимость отношения амплитуд выходного и входного гармонических сигналов от частоты в установившемся режиме:

$$A(\omega) = \frac{A_y}{A_x}. \quad (24)$$

Фазовой частотной характеристикой (ФЧХ) называется зависимость разности фаз $\varphi(\omega)$ между выходным и входным сигналами от частоты в установившемся режиме.

Одному периоду колебаний выходного сигнала T_n соответствует разность фаз в радианах, равная 2π . Поэтому разность фаз по графику можно рассчитать из пропорции

$$\frac{\varphi(\omega)}{\varphi_n} = \frac{2\pi}{T_n} :$$

$$\varphi(\omega) = \frac{2\pi \varphi_n}{T_n}, \quad (25)$$

где φ_n – отставание выходного сигнала от входного, с.

Амплитудно-фазовой частотной характеристикой (АФЧХ) называется совместная амплитудная и фазовая частотная характеристика.

АЧХ, ФЧХ и АФЧХ называются **частотными характеристиками** звена и определяют реакцию звена на гармоническое входное воздействие в зависимости от его частоты.

Расчет частотных характеристик звена. В выражении передаточной функции звена $W(s)$ выполним подстановку $s = j\omega$ и получим частотную передаточную функцию $W(j\omega)$. После избавления от возможной мнимости в знаменателе, можем представить частотную передаточную функцию в виде комплексного выражения

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega), \quad (26)$$

где $U(\omega)$ – действительная часть частотной передаточной функции;
 $V(\omega)$ – мнимая часть частотной передаточной функции.

Как действительная $U(\omega)$, так и мнимая $V(\omega)$ части частотной передаточной функции $W(j\omega)$ представляют собой выражения, зависящие только от частоты ω .

Применив формулу Эйлера, частотную передаточную функцию можно представить в виде

$$W(\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)},$$

где $A(\omega)$ – амплитуда частотной передаточной функции (соответствует АЧХ);

$\varphi(\omega)$ – фаза частотной передаточной функции (соответствует ФЧХ), рад.

Тогда для вычисления АЧХ и ФЧХ получаем следующие формулы:

$$A(\omega) = \sqrt{(U(\omega))^2 + (V(\omega))^2}; \quad (27)$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)}. \quad (28)$$

Построение графиков АЧХ, ФЧХ и АФЧХ

При построении графиков АЧХ и ФЧХ по оси абсцисс откладывают значения частоты ω от 0 до ∞ , а по оси ординат – соответствующие значения $A(\omega)$ или $\varphi(\omega)$.

График АФЧХ, называемый также *годографом Найквиста*, объединяет на одной плоскости АЧХ и ФЧХ. Его можно строить двумя способами: используя прямоугольные декартовы или полярные координаты.

При построении графика АФЧХ *в прямоугольных декартовых координатах* по известным значениям $U(\omega)$ и $V(\omega)$ на комплексной плоскости для каждого значения частоты ω по горизонтальной оси следует откладывать значения действительной части частотной передаточной функции $U(\omega)$, а по вертикальной оси – соответствующие значения мнимой части $V(\omega)$.


При построении графика АФЧХ *в полярных координатах* по известным значениям $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ на комплексной плоскости для каждого значения частоты ω , поступают следующим образом:

- значение ФЧХ $\varphi(\omega)$ откладывают как угол от положительного направления оси абсцисс;
- на построенном луче откладывают длину АЧХ $A(\omega)$ для этой частоты и получают точку;
- точки, полученные при изменении частоты ω от 0 до ∞ , соединяют плавной линией.

2. Получение частотных характеристик пропорционального (безынерционного) звена

Создайте в надстройке Simulink пакета MATLAB схему для получения частотных характеристик пропорционального (безынерционного) звена.

Запустите систему компьютерного моделирования MATLAB и пакета Simulink (см. выполнение лабораторной работы № 1).

Откройте модель, созданную при исследовании статических характеристик пропорционального звена при выполнении лабораторной работы № 2, нажав на кнопку  Открыть панели инструментов основного окна MATLAB или выбрав в меню основного окна MATLAB пункт File→Open...

Для моделирования подачи гармонического напряжения на вход исследуемой электрической цепи внесите в модель следующие

изменения: удалите блок **U1** источника постоянного напряжения, блок **Breaker**, блок **Step** подачи ступенчатого управляющего сигнала.

Удалить блок из схемы можно одним из двух способов:

- 1) выделить данный блок однократным щелчком *правой* клавишей мыши и во всплывающем меню выбрать пункт **Clear**;
- 2) выделить данный блок однократным щелчком *левой* клавишей мыши и затем нажать на клавиатуре клавишу **Delete**.

Далее на место удаленных блоков нужно вставить источник переменного гармонического напряжения. Для этого на вкладке **Electrical Sources** в библиотеке **SimPowerSystems** в окне **Simulink Library Browser** выберите блок **AC Voltage Source** (Источник переменного напряжения) и перетащите его в окно с моделируемой схемой. Название блока **AC Voltage Source** измените на **U1**. Вход блока **U1** соедините с нулевой линией, а выход – со входом блока **R1**. Задайте параметры источника **U1**. Двойным щелчком левой клавишей мыши по нему откройте окно задания параметров блока **Block parameters: U1** и в полях **Peak amplitude (V)** и **Frequency (Hz)** введите значения, соответственно, амплитуды (в вольтах) – 5, и частоты (в герцах) – 0.66. Подтвердите ввод нажатием кнопок **Apply** и **OK**.

Примерный вид полученной модели изображен на рис. 19.

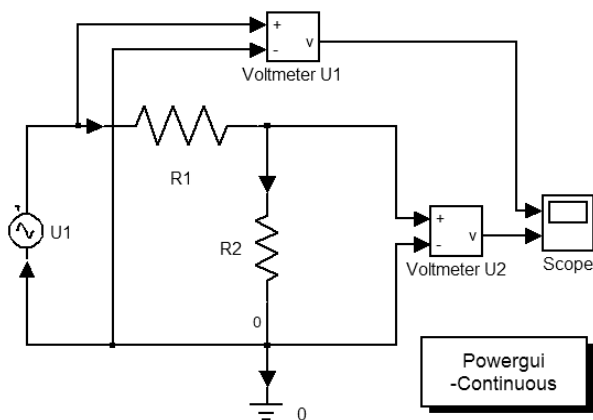


Рис. 19. Схема для получения частотных характеристик пропорционального звена в Simulink

Сохраните созданную модель в рабочую папку под другим именем (например, под именем `sin_voltage_prop.mdl`).

Запустив процесс моделирования (пункт меню **Simulation**→**Start**), увидим результат: в окне осциллографа на рис. 20 отображаются гармонические сигналы пропорционального звена: изменение напряжений U_1 и U_2 на входе и выходе цепи.

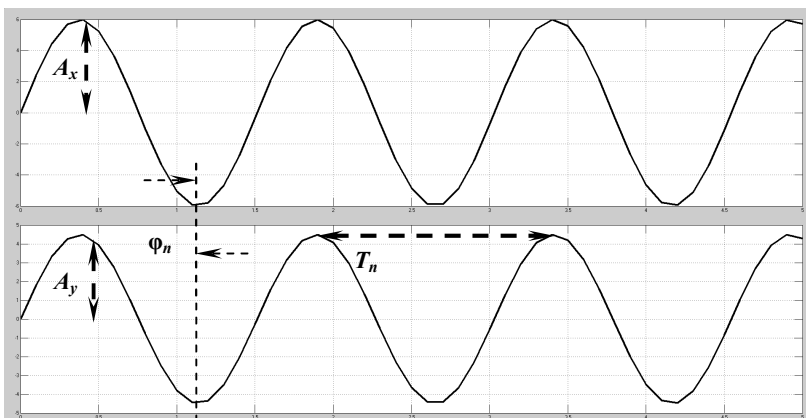


Рис. 20. Входной и выходной гармонические сигналы

Для нахождения амплитуды входного сигнала A_x следует на верхнем графике измерить по вертикальной оси расстояние от верхней точки любого периода до нуля (см. рис. 20), или, что то же самое, расстояние от нижней точки любого периода до нуля (можно также измерить расстояние от верхней до нижней точки одного периода и разделить пополам).

Амплитуда выходного сигнала A_y находится аналогично, но измерения проводятся на нижнем графике.

Для измерения отставания φ_n следует заметить одну и ту же точку (например, минимум (см. рис. 20), максимум или ноль) для соответствующих периодов на верхнем и нижнем графиках и определить координаты этих точек по горизонтальной оси. Затем нужно из координаты точки на верхнем графике вычесть координату соответствующей точки на нижнем графике.

Заметим, что для исследуемого звена разность фаз (и отставание, см. рис. 20) будет равна нулю для всех частот.

Период выходного сигнала T_n измеряется по нижнему графику – это будет расстояние (по горизонтальной оси) между двумя соседними максимумами (см. рис. 20) или минимумами выходного гармонического сигнала.

Проведите компьютерное моделирование схемы для значений частоты переменного гармонического входного напряжения U_1 (0.16, 0.33, 0.66, 1.57, 3.77 Гц) и для значения амплитуды входного напряжения 5 В. Для каждого значения частоты определите по экрану осциллографа амплитуды входного A_x и выходного A_y сигналов в единицах вертикальной шкалы экрана (в вольтах), а также отставание φ_n и период выходного сигнала T_n в единицах горизонтальной шкалы экрана (в секундах). Результаты внесите в графы A_x , A_y , φ_n и T_n табл. 3.

Для более точных измерений по экрану осциллографа можно воспользоваться экранной лупой как по оси X , так и по оси Y .

Рассчитайте АЧХ по формуле (24), результаты расчетов для всех рассмотренных частот внесите в строку $A(\omega)$ табл. 3.

Рассчитайте ФЧХ по формуле (25), результаты расчетов для всех рассмотренных частот внесите в строку $\varphi(\omega)$ табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений и расчетов для построения экспериментальных и теоретических частотных характеристик звена

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	0.16	0.33	0.66	1.57	3.77	∞
$A_p(\omega)$							
$\varphi_p(\omega)$							
$A_x, \text{В}$	–						–
$A_y, \text{В}$	–						–
T_n	–						–
φ_n	–						–
$A(\omega)$							
$\varphi(\omega)$							

3. Получение теоретических частотных характеристик пропорционального (безынерционного) звена

Получение передаточной функции звена. Выполним преобразование Лапласа уравнения (13):

$$U_2(s) = K U_1(s).$$

Найдем отношение изображений выходного $U_2(s)$ и входного $U_1(s)$ сигналов и получим передаточную и частотную передаточную функции звена:

$$W(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = K. \quad (29)$$

Расчет частотных характеристик звена. В выражении (29) передаточной функции выполним подстановку $s = j\omega$ и получим

$$W(\omega) = K = K + j0$$

В результате получилось комплексное выражение вида

$$W(\omega) = U(\omega) + jV(\omega),$$

где K – действительная часть частотной передаточной функции, $U(\omega) = K$;

V – мнимая часть частотной передаточной функции, $V(\omega) = 0$.

Тогда для АЧХ и ФЧХ по формулам (27) и (28) получаем соответственно

$$A(\omega) = \sqrt{K^2 + 0^2} = K; \quad (30)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{0}{K} = \arctg 0 = 0. \quad (31)$$

Проведите расчет теоретических значений $A_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$ для значений частоты переменного гармонического входного напряжения U_1 (0, 0.16, 0.33, 0.66, 1.57, 3.77, ∞ Гц) и значения входной амплитуды (5 В) по формулам (30) и (31), предварительно рассчитав K по формуле (12). Результаты занести в строки $A_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$

табл. 3, продублировав их в строках $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для значений $A(0)$ и $\varphi(0)$ (при $\omega = 0$) и $A(\infty)$ и $\varphi(\infty)$ (при $\omega = \infty$).

4. Построение полученных частотных характеристик в одних координатах

Постройте следующие графики:

- по результатам расчета $A(\omega)$ и $A_p(\omega)$ – экспериментальную и теоретическую АЧХ (в одних координатах);
- по результатам расчета $\varphi(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$ – экспериментальную и теоретическую ФЧХ (в одних координатах);
- экспериментальную и теоретическую АФЧХ (в одних координатах).

Общий вид графиков АЧХ и ФЧХ пропорционального звена показан на рис. 21.

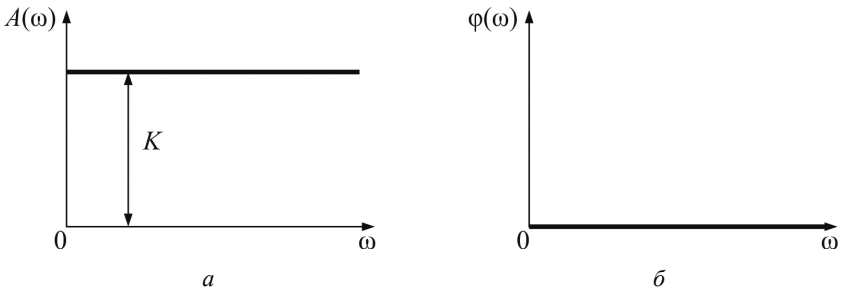


Рис. 21. Общий вид графиков АЧХ (а) и ФЧХ (б) пропорционального звена

Общий вид графика АФЧХ для пропорционального звена показан на рис. 22.

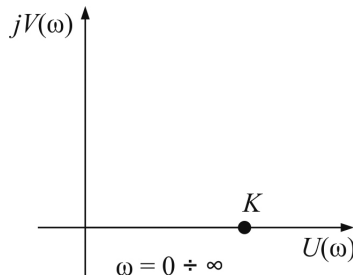


Рис. 22. Общий вид графика АФЧХ пропорционального звена

Получите графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ пропорционального звена с помощью инструмента Powergui.

Для *получения частотных характеристик* исследуемой цепи используется специальный блок Powergui, расположенный в библиотеке SimPowerSystems. Данный блок содержит в себе несколько полезных инструментов для выполнения анализа электрических схем (расчет схемы векторным методом, расчет установившегося режима, расчет частотных характеристик и т. д.).

Поместите блок Powergui в окно с исследуемой схемой (на рис. 20 он обозначен как Powergui-Continuous). Затем выполните по нему двойной щелчок левой клавишей мыши, в результате чего откроется окно (название окна совпадает с именем файла созданной модели), отображающее все инструменты анализа, входящие в блок Powergui. Вам потребуется инструмент LTI-Viewer (Анализатор линейных стационарных систем), для открытия которого выполните щелчок левой клавишей мыши на кнопке Use LTI-Viewer. В появившемся окне Powergui link to LTI view показаны имеющиеся входы System inputs и выходы System outputs системы. По умолчанию в качестве входа и выхода модели выбраны первые элементы в списках. Измените выбранный выход U_Voltmeter U1 на U_Voltmeter U2 и нажмите кнопку Open new LTI-Viewer.

В открывшемся окне инструмента LTI-Viewer по умолчанию показан рассчитанный автоматически график переходной функции анализируемой схемы. Для отображения графиков АЧХ и ФЧХ правой клавишей мыши щелкните один раз на белом поле с графиком и во всплывающем меню выберите пункт Plot Types→Bode. Верхний из двух появившихся графиков – график АЧХ, а нижний – ФЧХ системы. Щелкните на одном из графиков правой клавишей мыши и во всплывающем меню поставьте галочку в пункте Grid (отображение сетки на графиках). Повторив щелчок правой клавишей мыши, выберите пункт Properties всплывающего меню, на вкладке Units задайте единицы измерения по осям графиков: для частоты в поле Frequency in выберите значение Hz (в герцах), для отношения амплитуд сигналов на входе и выходе схемы в поле Magnitude in вместо dB (децибел) выберите значение absolute. Вид полученных графиков показан на рис. 23.

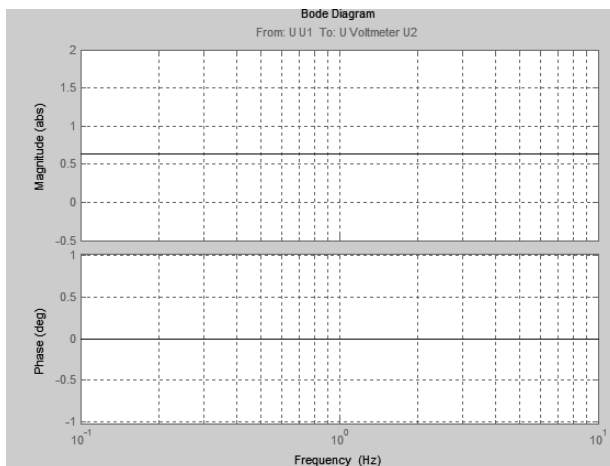


Рис. 23. Примерный вид графиков АЧХ и ФЧХ пропорционального звена

Для получения графика АФЧХ исследуемой схемы следует щелкнуть по одному из графиков правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выбрать пункт **Plot Types**→**Nyquist**. Далее следует повторить щелчок правой клавишей мыши по полученному графику и в пункте меню **Show**→**Negative Frequencies** убрать галочку. Полученный график имеет вид, показанный на рис. 24.

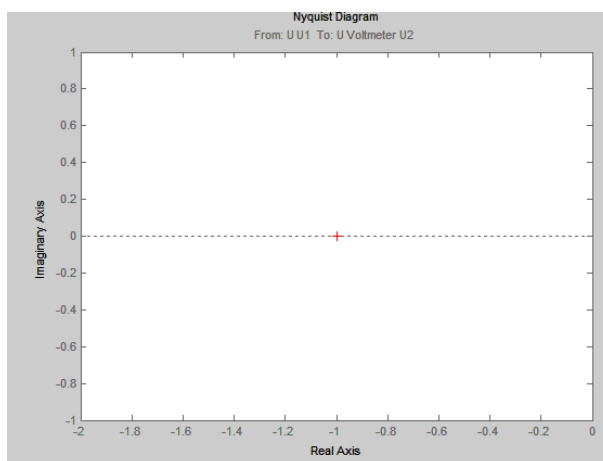


Рис. 24. Примерный вид графика АФЧХ пропорционального звена

5. Выводы о соответствии полученных экспериментальных и теоретических частотных характеристик пропорционального звена

Сравните графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ пропорционального звена, полученные различными способами, и сделайте выводы об их соответствии.

6. Получение экспериментальных и теоретических частотных характеристик аperiodического звена первого порядка (инерционного)

Измените модель аperiodического звена первого порядка, созданную при выполнении лабораторной работы № 1, для получения частотных характеристик аналогично тому, как это было проведено при выполнении пункта 2 данной лабораторной работы.

Приблизительный вид схемы для получения частотных характеристик аperiodического звена первого порядка показан на рис. 25.

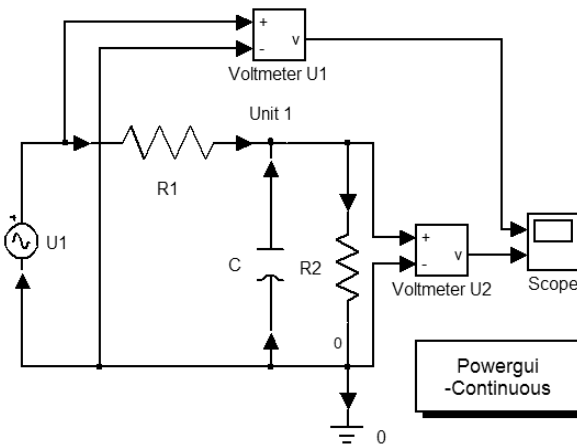


Рис. 25. Схема для получения частотных характеристик аperiodического звена первого порядка в Simulink

Сохраните созданную модель в рабочую папку под другим именем (например, под именем `sin_voltage_a1p.mdl`).

Запустив процесс моделирования (пункт меню **Simulation**→**Start**), увидим результат: в окне осциллографа на рис. 26 отображаются

гармонические сигналы – изменение напряжений U_1 и U_2 на входе и выходе цепи.

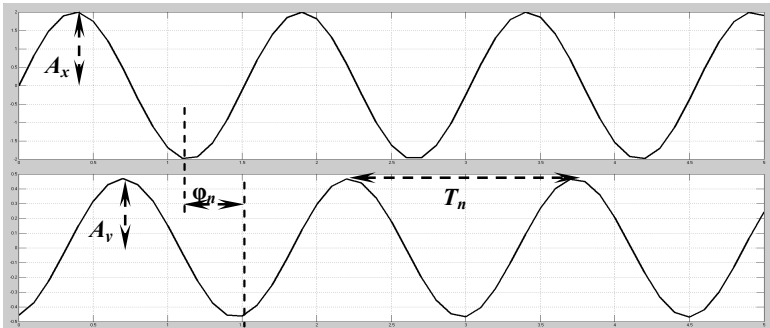


Рис. 26. Расчет частотных характеристик аperiodического звена первого порядка

Проведите компьютерное моделирование схемы и измерения амплитуды входного A_x и выходного A_y сигналов, отставания φ_n и периода T_n аналогично тому, как это было сделано при выполнении пункта 2 лабораторной работы. Постройте таблицу, аналогичную табл. 3, для исследования аperiodического звена первого порядка. Результаты внесите в графы A_x , A_y , φ_n и T_n таблицы.

Заметим, что в этом случае разность фаз уже будет отлична от нуля и различна для разных частот.

Рассчитайте АЧХ по формуле (24), результаты расчетов для всех рассмотренных частот внесите в строку $A(\omega)$ таблицы.

Рассчитайте ФЧХ по формуле (25), результаты расчетов для всех рассмотренных частот внесите в строку $\varphi(\omega)$ таблицы.

Получение теоретических частотных характеристик аperiodического звена первого порядка (инерционного)

Получение передаточной функции звена. Выполним преобразование дифференциального уравнения (15):

$$Ts U_2(s) + U_2(s) = K U_1(s).$$

Найдем отношение изображений выходного $U_2(s)$ и входного $U_1(s)$ сигналов и получим передаточную и частотную передаточную функции звена:

$$W(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{K}{T s + 1}. \quad (32)$$

Расчет частотных характеристик звена. В выражении передаточной функции (32) выполним подстановку $s = j\omega$ и преобразуем его следующим образом:

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{K}{T j\omega + 1} = \frac{K(1 - j(T\omega))}{(1 + j(T\omega))(1 - j(T\omega))} = \\ &= \frac{K + j(-KT\omega)}{1^2 + (T\omega)^2} = \frac{K}{1 + (T\omega)^2} + j \frac{-KT\omega}{1 + (T\omega)^2}. \end{aligned}$$

В результате получилось комплексное выражение вида

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega),$$

где $U(\omega)$ – действительная часть частотной передаточной функции:

$$U(\omega) = \frac{K}{1 + (T\omega)^2};$$

$V(\omega)$ – мнимая часть частотной передаточной функции:

$$V(\omega) = \frac{-KT\omega}{1 + (T\omega)^2}.$$

Тогда для АЧХ и ФЧХ по формулам (27) и (28) получаем соответственно

$$A(\omega) = \sqrt{\left(\frac{K}{1 + (T\omega)^2}\right)^2 + \left(\frac{-KT\omega}{1 + (T\omega)^2}\right)^2} = \frac{K}{\sqrt{1 + (T\omega)^2}}; \quad (33)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\frac{-KT\omega}{1 + (T\omega)^2}}{\frac{K}{1 + (T\omega)^2}} = -\arctg(T\omega). \quad (34)$$

Проведите расчет теоретических значений $A_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$ для значений частот переменного гармонического входного напряжения U_1 (0, 0.16, 0.33, 0.66, 1.57, 3.77, ∞ Гц) и значения входной амплитуды (5 В) по формулам (33) и (34), предварительно рассчитав T и K по формулам (16) и (17). Результаты занесите в строки $A_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$ таблицы, продублировав их в строках $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для значений $A(0)$ и $\varphi(0)$ (при $\omega = 0$) и $A(\infty)$ и $\varphi(\infty)$ (при $\omega = \infty$).

Постройте следующие графики:

- по результатам расчета $A(\omega)$ и $A_p(\omega)$ – экспериментальную и теоретическую АЧХ (в одних координатах);
- по результатам расчета $\varphi(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$ – экспериментальную и теоретическую ФЧХ (в одних координатах);
- экспериментальную и теоретическую АФЧХ (в одних координатах).

Общий вид графиков АЧХ и ФЧХ аperiodического звена первого порядка показан на рис. 27, а АФЧХ – на рис. 28.

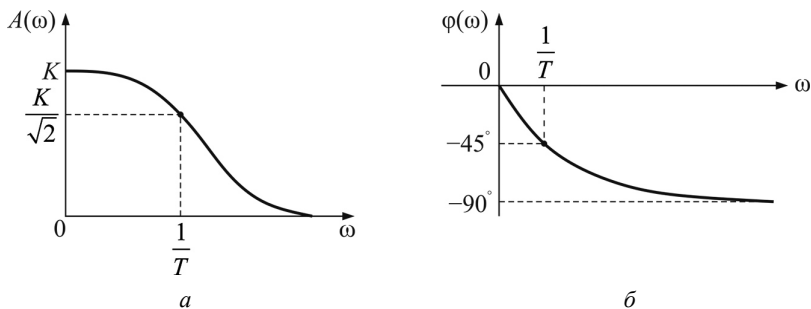


Рис. 27. Общий вид графиков АЧХ (а) и ФЧХ (б) аperiodического звена первого порядка

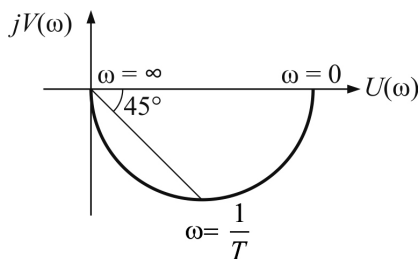
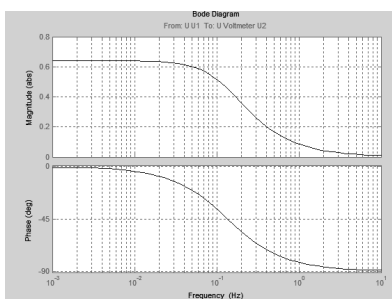


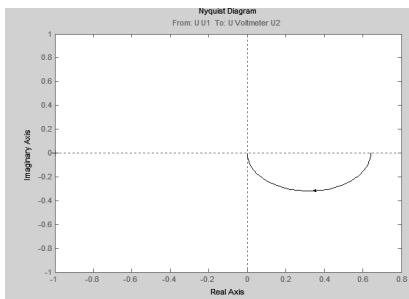
Рис. 28. Общий вид графика АФЧХ аperiodического звена первого порядка

Получите графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ апериодического звена первого порядка с помощью инструмента Powergui, аналогично тому, как это было проведено при исследовании пропорционального звена.

Получаемые графики частотных характеристик приведены на рис. 29 а, б.



а



б

Рис. 29. Графики частотных характеристик апериодического звена первого порядка: а) АЧХ и ФЧХ; б) АФЧХ

Сравните графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ апериодического звена первого порядка, полученные различными (тремя) способами, и сделайте выводы об их соответствии.

7. Получение экспериментальных и теоретических частотных характеристик звена чистого запаздывания

Измените модель звена чистого запаздывания, созданную при выполнении лабораторной работы № 1, для получения частотных характеристик: удалите блок Step подачи ступенчатого управляющего сигнала.

Это можно сделать одним из двух способов:

1. выделить данный блок однократным щелчком *правой* клавишей мыши и во всплывающем меню выбрать пункт **Clear**;
2. выделить данный блок однократным щелчком *левой* клавишей мыши и затем нажать на клавиатуре клавишу **Delete**.

На место удаленного блока поставьте источник гармонического входного сигнала.

Для этого в окне **Simulink Library Brouser** в библиотеке **Simulink** на вкладке **Sources** найдите пиктограмму блока **Sin Wave** (Генератор синусоидального сигнала), выделите его левой клавишей мыши и, не отпуская ее, перетащите данный компонент в окно редактирования модели.

Выход блока **Sin Wave** соедините со входом блока **Transport Delay**. Двойным щелчком левой клавишей мыши по нему откройте окно задания параметров блока **Sin Wave** и в поле **Amplitude** и **Frequency (rad/s)** введите значения, соответственно, амплитуды – 2, и частоты – 1. Подтвердите ввод нажатием кнопок **Apply** и **OK**.

Приблизительный вид полученной модели показан на рис. 30.

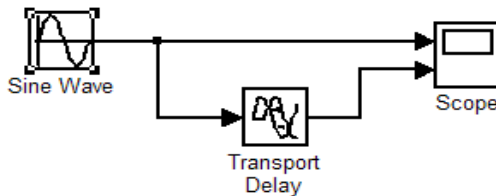


Рис. 30. Схема для получения частотных характеристик звена запаздывания в Simulink

Сохраните созданную модель на жесткий диск под другим именем (например, под именем `sin_voltage_delay.mdl`).

При запуске процесса моделирования (пункт меню **Simulation**→**Start**) для времени моделирования, равного 15 с, в окне осциллографа на рис. 31 отобразятся гармонические сигналы – изменение входного и выходного сигналов.

При этом для получения экспериментальных характеристик значения входных амплитуды и частоты следует задавать непосредственно в блоке **Sin Wave**.

Проведите компьютерное моделирование схемы и измерения амплитуды входного A_x и выходного A_y сигналов, отставания φ_n и периода T_n аналогично тому, как это было сделано при выполнении пункта 2 лабораторной работы. Постройте таблицу, аналогичную табл. 3, для исследования звена чистого запаздывания. Результаты внесите в графы A_x , A_y , φ_n и T_n таблицы.

Рассчитайте АЧХ по формуле (24), результаты расчетов для всех рассмотренных частот внесите в строку $A(\omega)$ таблицы.

Рассчитайте ФЧХ по формуле (25), результаты расчетов для всех рассмотренных частот внесите в строку $\varphi(\omega)$ таблицы.

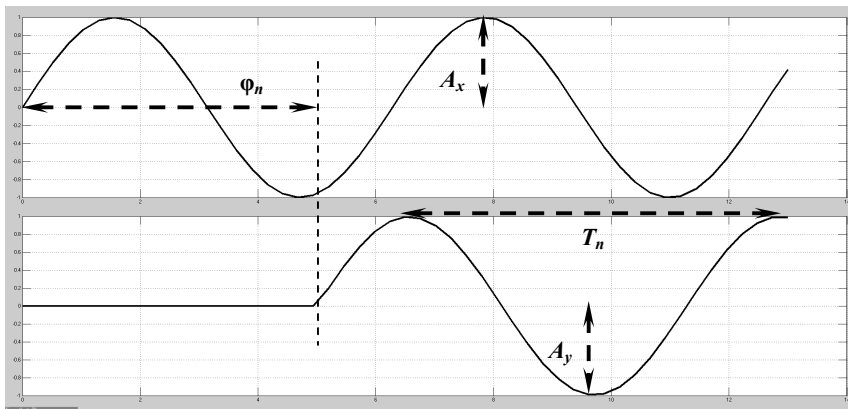


Рис. 31. Расчет частотных характеристик звена запаздывания

Теоретические частотные характеристики звена запаздывания

Получение передаточной функции звена. Выполним преобразование Лапласа уравнения (20):

$$Y(s) = e^{-\tau s} X(s).$$

Найдем отношение изображений выходного $Y(s)$ и входного $X(s)$ сигналов и получим передаточную и частотную передаточную функции звена:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-\tau s}. \quad (35)$$

Расчет частотных характеристик звена. В выражении передаточной функции (35) выполним подстановку $s = j\omega$ и преобразуем его следующим образом:

$$W(\omega) = e^{-j\tau\omega}.$$

Тогда для АЧХ и ФЧХ получаем, соответственно, следующие формулы:

$$A(\omega) = 1; \quad (36)$$

$$\varphi(\omega) = -\tau \omega. \quad (37)$$

Проведите расчет теоретических значений $A_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$ для значений частоты переменного гармонического входного напряжения U_1 (0, 0.16, 0.33, 0.66, 1.57, 3.77, ∞ Гц) и значения входной амплитуды (5 В) по формулам (36) и (37) (значение времени запаздывания τ соответствует варианту). Результаты занести в строки $A_p(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$ таблицы, продублировав их в строках $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для значений $A(0)$ и $\varphi(0)$ (при $\omega = 0$) и $A(\infty)$ и $\varphi(\infty)$ (при $\omega = \infty$).

Постройте следующие графики:

- по результатам расчета $A(\omega)$ и $A_p(\omega)$ – экспериментальную и теоретическую АЧХ (в одних координатах);
- по результатам расчета $\varphi(\omega)$ и $\varphi_p(\omega)$ – экспериментальную и теоретическую ФЧХ (в одних координатах);
- экспериментальную и теоретическую АФЧХ (в одних координатах).

Общий вид графиков АЧХ и ФЧХ звена запаздывания показан на рис. 32 а, а графика АФЧХ – на рис. 32, б.

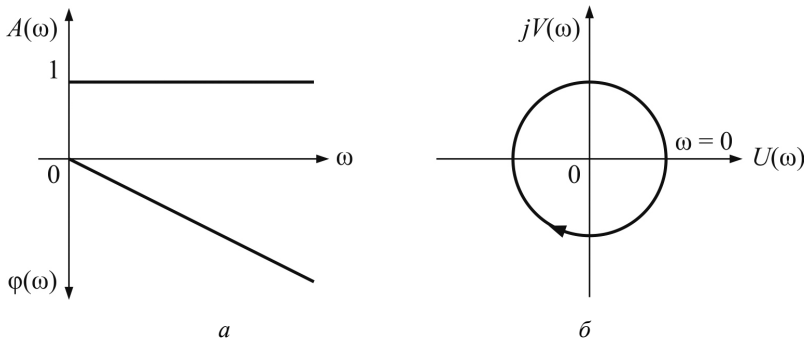


Рис. 32. Примерный вид графиков АЧХ и ФЧХ (а) и АФЧХ (б) звена запаздывания

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Результаты исследования пропорционального (безынерционного) звена:
 - 1) данные для построения экспериментальных и теоретических частотных характеристик (табл. 3);
 - 2) графики экспериментальных и теоретических АЧХ, ФЧХ и АФЧХ, а также графики характеристик, полученных с помощью компонента Powergui;
 - 3) выводы о соответствии экспериментальных характеристик теоретическим.
3. Результаты исследования апериодического звена первого порядка (инерционного).
4. Результаты исследования звена запаздывания.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение: АЧХ, ФЧХ, АФЧХ.
2. Как называется график АФЧХ? Как он строится?
3. Изложите методику получения частотных характеристик линейных звеньев теоретическим и экспериментальным методами.
4. Опишите полученные графики.

Исходные данные

Вариант	R_1 , Ом	R_2 , Ом	C , Ф	τ , с
1	1000	1000	0,001	3
2	1000	2000	0,001	4
3	1000	3000	0,001	5
4	1000	4000	0,001	6
5	1000	5000	0,001	7

Лабораторная работа № 4
**ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ГЛАДКИХ
НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНЬЕВ
СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ**

Цель работы: освоить методику линеаризации гладких нелинейных характеристик звеньев систем автоматизации на примере резистивного моста как устройства сравнения.

Задание:

1. Провести линеаризацию нелинейного уравнения статической характеристики резистивного моста графоаналитическим методом.
2. Провести линеаризацию нелинейного уравнения статической характеристики резистивного моста аналитическим методом.
3. Сделать выводы о соответствии линеаризованных статических характеристик друг другу.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы используется лабораторный стенд, содержащий панель лабораторных работ (рис. 33) и схему исследуемого резистивного моста (рис. 34).

Для измерения напряжения питания схемы U_{Π} и выходного напряжения разбаланса моста U_M используются имеющиеся на панели лабораторных работ вольтметры V1 и V2. Для имитации датчика (R_d) и задатчика ($R_{зад}$) используются магазины сопротивлений. Для включения в мост магазинов сопротивлений и соединения моста с вольтметрами стенда используется комплект проводов с наконечниками.

Выполнение работы

1. Линеаризация нелинейного уравнения статической характеристики резистивного моста графоаналитическим методом

Получение экспериментальных данных

Соедините проводами с наконечниками выходы напряжения питания моста U_{Π} (рис. 1) с входами «←» и 15 В вольтметра стенда.

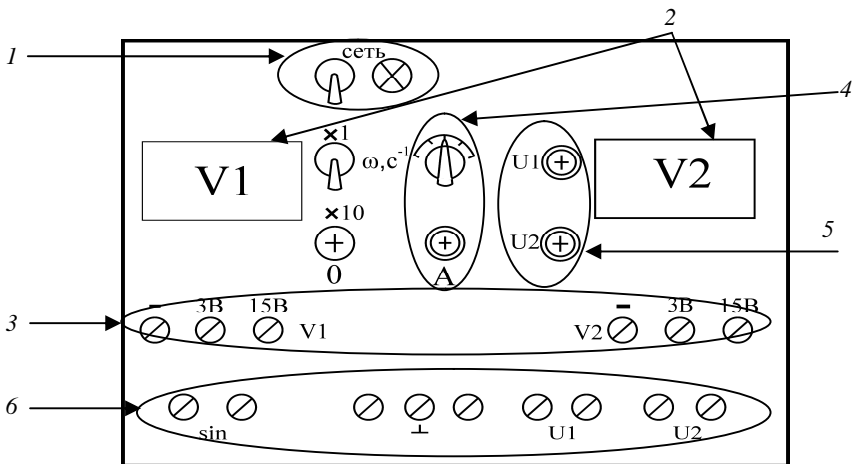


Рис. 33. Панель лабораторных работ

1 – тумблер и сигнальная лампа «Сеть», предназначенные для включения и индикации наличия питания; 2 – вольтметры V1 и V2;
 3 – гнезда входов вольтметров с пределами измерений 15 В или 3 В;
 4 – переключатель выбора частоты ω , c^{-1} и ручка A плавного регулирования амплитуды напряжения; 5 – ручки регулирования уровней напряжения для первого источника – U1; для второго – U2; 6 – гнезда выходов генератора синусоидального напряжения обозначены sin и гнезда выходов первого и второго источников питания обозначены соответственно U1 и U2

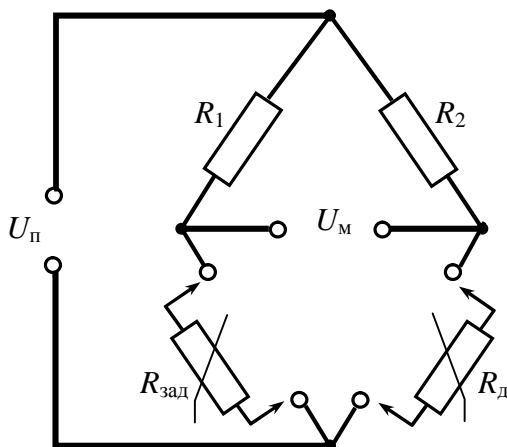


Рис. 34. Схема исследуемого резистивного моста

Включите питание лабораторного стенда и измерьте напряжение питания моста U_{Π} с помощью вольтметра стенда. Выключите питание лабораторного стенда.

Запишите значение напряжения питания моста U_{Π} и указанные на стенде значения сопротивлений R_1 и R_2 .

Подсоедините к схеме на панели лабораторных работ магазины, имитирующие датчик и задатчик (см. рис. 34). Подсоедините выход моста (U_M) к вольтметру стенда. Установите на соответствующем магазине значение сопротивления $R_{Д0}$ датчика, при котором будет проводиться линеаризация (по вариантам).

Включите питание лабораторной установки и сбалансируйте мост магазином, имитирующим задатчик.

Изменяя сопротивление $R_{Д}$ датчика от 0 до 4 кОм через 200 Ом и от 4 кОм до 9 кОм через 1 кОм, снимите зависимость $U_M(R_{Д})$ с заполнением табл. 4.

Таблица 4

Экспериментальная зависимость напряжения на выходе моста от изменения сопротивления датчика

$R_{Д}, \text{Ом}$	0	200	400	...	7000	8000	9000
$U_M, \text{В}$...			

Линеаризация статической характеристики моста по экспериментальным данным

Идея *графоаналитического метода линеаризации* заключается в замене исходной нелинейной характеристики звена $y = f(x)$ нелинейной функцией в окрестностях некоторой точки с координатами x_0, y_0 , соответствующей заданному режиму работы. При этом линейная характеристика является *касательной* к исходной нелинейной в этой точке (рис. 35).

Коэффициент передачи находится как отношение $\Delta y / \Delta x$ для любых двух точек касательной в точке линеаризации.

Постройте график полученной экспериментальной нелинейной характеристики моста, откладывая по оси абсцисс значения задаваемых сопротивлений, а по оси ординат – измеряемого напряжения разбаланса моста.

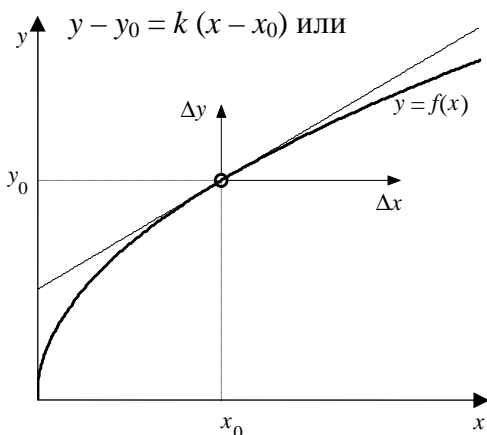


Рис. 35. Нелинейная статическая характеристика

Проведите касательную в точке баланса моста. Перенесите координаты в точку линеаризации.

Определите по графику значения ΔU_M и ΔR_D , при которых график касательной практически совпадает с графиком статической характеристики моста, построенным по экспериментальным данным.

Рассчитайте коэффициент K_M моста как отношение

$$K_M = \Delta U_M / \Delta R_D . \quad (38)$$

Запишите линеаризованное уравнение моста вида

$$U_{M \text{ э}} = K_M \Delta R_D ,$$

подставив рассчитанный коэффициент пропорциональности K_M .

2. Линеаризация нелинейного уравнения статической характеристики резистивного моста аналитическим методом

По математическому описанию элементы и системы автоматики делятся на линейные и нелинейные.

Линейными элементами (звеньями) называются элементы автоматики, математически описываемые линейными дифференциальными уравнениями.

Линейными системами автоматического управления называются системы, состоящие только из линейных элементов.

В общем случае для линейного элемента (или системы) взаимосвязь входного сигнала u и выходного сигнала y математически описывается дифференциальным уравнением вида:

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = b_0 \frac{d^m u}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + \dots + a_m u, \quad (39)$$

где a_0, a_1, \dots, a_n и b_0, b_1, \dots, b_m – некоторые постоянные коэффициенты;

n – порядок системы, $m < n$.

Нелинейными элементами называются элементы, описываемые нелинейными уравнениями.

Система, содержащая хотя бы один нелинейный элемент, является **нелинейной**.

Резистивный мост (рис. 36) часто используется как элемент сравнения, если в системе применяется омический датчик регулируемой величины. Датчик включается в одно из плеч моста. Сопротивление датчика R_d является входным сигналом моста. В качестве задатчика регулируемой величины используется одно из сопротивлений, образующих мост ($R_{зад}$), которое выполняется переменным. Выходным сигналом моста является напряжение U_m . В состоянии баланса моста напряжение на выходе моста равно нулю.

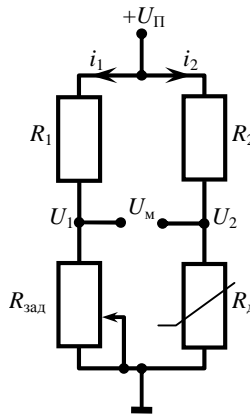


Рис. 36. Измерительный резистивный мост

Получим уравнение резистивного моста, используя законы Кирхгофа:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= i_1 R_{3\Delta D} = \frac{U_{\Pi}}{R_1 + R_{3\Delta D}} R_{3\Delta D}, \\
 U_2 &= i_2 R_D = \frac{U_{\Pi}}{R_2 + R_D} R_D, \\
 U_M &= U_1 - U_2 = \frac{U_{\Pi}}{R_1 + R_{3\Delta D}} R_{3\Delta D} - \frac{U_{\Pi}}{R_2 + R_D} R_D, \quad (40)
 \end{aligned}$$

где U_M – напряжение на выходе моста, В;

U_{Π} – напряжение питания на выходе моста, В;

$R_1, R_2, R_{3\Delta D}, R_D$ – сопротивления, образующие мост, Ом.

Связь между сопротивлением задатчика и заданным значением регулируемой величины определяется *условием равновесия моста*:

$$R_{D0} R_2 - R_1 R_{3\Delta D} = 0,$$

тогда

$$R_{3\Delta D} = \frac{R_2 R_{D0}}{R_1}, \quad (41)$$

где R_{D0} – сопротивление датчика при заданном значении регулируемой величины (задается преподавателем).

Линеаризацию проводим в окрестности точки, для которой значение входного сигнала равно R_{D0} , а соответствующее значение выходного сигнала равно U_{M0} .

Теоретической основой линеаризации является разложение функции в ряд Тейлора в окрестностях точки с координатами x_0, y_0 :

$$y(x) = y(x_0) + y'(x_0)(x - x_0) + \frac{y''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \dots$$

Если отклонения входного и выходного сигналов от заданных значений x_0, y_0 достаточно малы, то при разложении в ряд Тейлора

можно учитывать *только линейные члены*, а остальными пренебречь:

$$y(x) \approx y(x_0) + y'(x_0)(x - x_0). \quad (42)$$

Обозначив отклонения сигналов от номинальных значений как $\Delta x = x - x_0$, $\Delta y = y - y_0$, а также $y'(x_0) = k$, получаем линейное уравнение:

$$\Delta y = k \Delta x.$$

Линеаризуем уравнение моста *аналитическим* методом. Разложим функцию (40) в ряд Тейлора в окрестностях точки с координатами $R_{Д0}$, $U_{М0}$:

$$U_{М} = U_{М0} + \left(\frac{U_{\Pi}}{R_1 + R_{3\Delta Д}} R_{3\Delta Д} - \frac{U_{\Pi}}{R_2 + R_{Д}} R_{Д} \right)_{R_{Д}=R_{Д0}} (R_{Д} - R_{Д0}) = 0.$$

Получаем

$$U_{М} - U_{М0} = \left(0 - U_{\Pi} \frac{1(R_2 + R_{Д}) - R_{Д}(0+1)}{(R_2 + R_{Д})^2} \right)_{R_{Д}=R_{Д0}} (R_{Д} - R_{Д0}) = 0,$$

$$U_{М} - U_{М0} = - \frac{U_{\Pi} R_2}{(R_2 + R_{Д})^2} \Big|_{R_{Д}=R_{Д0}} (R_{Д} - R_{Д0}) = 0,$$

$$U_{М} - U_{М0} = - \frac{U_{\Pi} R_2}{(R_2 + R_{Д0})^2} (R_{Д} - R_{Д0}) = 0.$$

Обозначим $\Delta R_{Д} = R_{Д} - R_{Д0}$; $\Delta U_{М} = U_{М} - U_{М0}$.

Получаем

$$\Delta U_{М} = - \frac{U_{\Pi} R_2}{(R_2 + R_{Д0})^2} \Delta R_{Д},$$

или

$$\Delta U_M = K_M \Delta R_D,$$

где K_M – коэффициент передачи моста:

$$K_M = -\frac{U_{\text{п}} R_2}{(R_2 + R_{D0})^2}. \quad (43)$$

При использовании моста как элемента сравнения, нулевому отклонению регулируемой величины от заданного значения (нулевому отклонению сопротивления датчика от его сопротивления R_{D0} при заданном значении регулируемой величины) должен соответствовать нулевой выходной сигнал моста. Поэтому линейаризацию проводим в точке баланса моста при $U_{M0} = 0$. При этом линейаризованное уравнение имеет вид

$$U_M = K_M \Delta R_D. \quad (44)$$

Запишите в общем виде линейаризованное уравнение статической характеристики резистивного моста (44), полученное аналитическим методом.

Рассчитайте по формуле (43) значение коэффициента пропорциональности с использованием значений R_1 , R_2 , $R_{\text{зд}}$, $U_{\text{п}}$, полученных при выполнении пункта 1, и подставьте в полученное уравнение.

Запишите линейаризованное уравнение моста вида

$$U_{M T} = K_M \Delta R_D,$$

подставив рассчитанный коэффициент пропорциональности K_M .

Постройте в одних координатах с графиком, полученным при выполнении пункта 1, график полученного линейаризованного уравнения статической характеристики резистивного моста.

3. Сделайте вывод о соответствии линейаризованных статических характеристик друг другу

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Значения исходных данных: напряжения питания моста $U_{\text{п}}$, сопротивлений R_1 и R_2 , сопротивления R_{D0} датчика, при котором будет проводиться линейаризация.

3. Экспериментальные данные (табл. 4).
4. Графики нелинейной статической характеристики и линеаризованных статических характеристик, полученных двумя методами.
5. Расчет коэффициента передачи моста на основе графоаналитического метода.
6. Линеаризованное уравнение моста, полученное графоаналитическим методом.
7. Расчет коэффициента передачи моста аналитическим методом.
8. Линеаризованное уравнение моста, полученное аналитическим методом.
9. Выводы о соответствии линеаризованных статических характеристик, полученных аналитическим и графоаналитическим методами.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение линеаризации непрерывно дифференцируемых (гладких) характеристик элементов автоматики.
2. При каких условиях нелинейные характеристики могут быть линеаризованы?
3. Перечислите методы линеаризации гладких нелинейных характеристик.
4. Изложите порядок линеаризации аналитическим методом.
5. Изложите порядок линеаризации путем графоаналитической обработки экспериментально полученной нелинейной характеристики.
6. В каком диапазоне сопротивлений и напряжений можно использовать линеаризованные статические характеристики моста, полученные при выполнении лабораторной работы?

Исходные данные по вариантам

Вариант	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R _{до} , Ом
1	2000	2000	1000
2	2000	2000	1200
3	2000	2000	1400
4	2000	2000	1600
5	2000	2000	1800

Лабораторная работа № 5
**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ
И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ**

Цель работы: освоить методику приближенной идентификации линейных звеньев по виду переходной характеристики, методику компьютерной идентификации линейных звеньев.

Задание:

1. Получить экспериментальную переходную характеристику сушильного шкафа.
2. Провести идентификацию звена по виду переходной характеристики и получить математическое описание звена.
3. Провести идентификацию звена с помощью инструмента System Identification пакета MATLAB и получить математическое описание звена.
4. Сравнить передаточные функции, полученные в результате расчетов и компьютерной идентификации. Сделать выводы.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

В качестве объекта идентификации используется учебный сушильный шкаф типа ШСУ (рис. 37), имеющий объем сушильной камеры 10 л и максимальную температуру нагрева 150 °С. Для измерения температуры воздуха внутри шкафа установлена термопара ТХА(К)–1199, предназначенная для измерения температур в диапазоне от –40 до +800 °С.

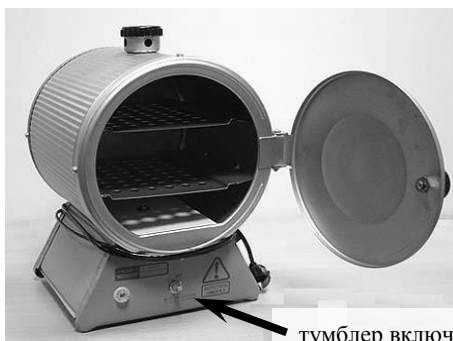


Рис. 37. Шкаф сушильный учебный

Для возможности передачи данных измерения на компьютер, термopара подключена к измерителю-регулятору СОСНА-003МД, расположенному на лабораторном стенде. Универсальный вход измерителя-регулятора дает возможность подключать без дополнительного согласования термопреобразователи сопротивления, термоэлектрические преобразователи (термопары) и преобразователи с выходными унифицированными сигналами тока или напряжения. Значение температуры внутри шкафа отображается на панели измерителя СОСНА-003МД.

Работа выполняется с использованием персональных ЭВМ, на которых установлена система компьютерных расчетов MATLAB с входящим в ее состав пакетом компьютерного моделирования Simulink и компьютерной программой SysView2, которая выполняет считывание и сохранение данных о температуре внутри шкафа с измерителя СОСНА-003МД на компьютер.

Выполнение работы

1. Получение экспериментальной переходной характеристики сушильного шкафа

Проведение измерений

Включите питание стенда выключателем QF.

Закройте дверцу сушильного шкафа. В начале эксперимента сушильный шкаф должен быть полностью остывшим: температура внутри шкафа должна быть равна наружной температуре.

Запустите компьютерную программу, которая выполняет считывание и сохранение данных о температуре внутри шкафа с измерителя СОСНА-003МД на компьютер. Для этого на компьютере нужно открыть папку `c:\Sosna_003MD\SysView2\` и запустить на выполнение файл `SysView.exe`. На экране компьютера появится окно (рис. 38).

В появившемся рабочем окне программы SysView следует указать интервал опроса датчика температуры Δt . Оставьте без изменений предлагаемое по умолчанию значение 5 с.

Программа SysView по умолчанию выполняет сохранение данных в текущую папку (`c:\Sosna_003MD\SysView2\`) в текстовый файл с именем `307_080917 COM1 Прибор1.txt`.

Если файл с таким именем уже существует в каталоге, удалите его. Включите тумблером сушильный шкаф (см. рис. 37) и одновременно запустите начало измерений в программе SysView: нажмите левой клавишей мыши на кнопку **Запуск** (см. рис. 38).

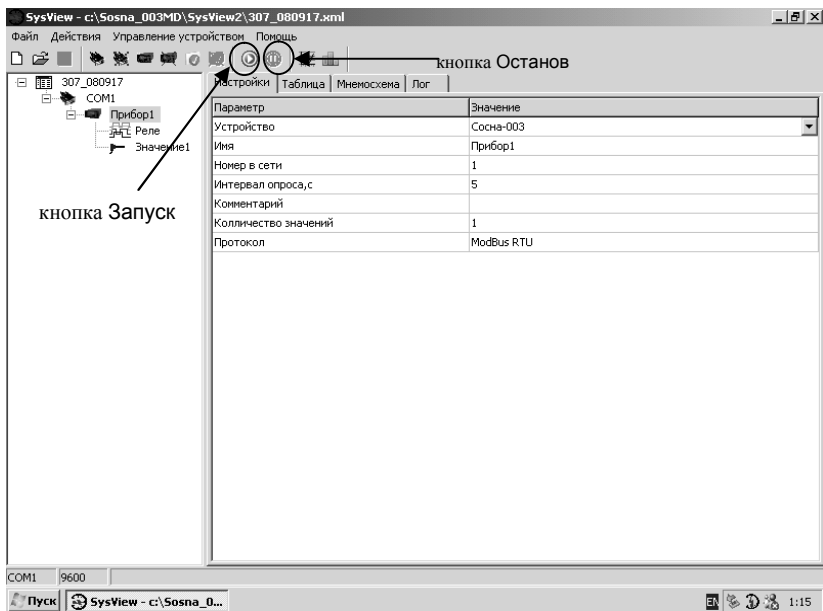


Рис. 38. Рабочее окно программы SysView

При включении электронагревателя выделяемая им тепловая мощность скачкообразно изменяется от 0 Вт и составляет около 100 Вт. Температура внутри печки θ начинает повышаться. Измеритель СОСНА-003МД выполняет измерение температуры θ внутри сушильного шкафа в дискретные моменты времени $t_k = k \Delta t$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), через определенный интервал времени Δt , называемый интервалом дискретизации (например, каждые 5 с). Результаты измерений отображаются на панели измерителя СОСНА-003МД, а также передаются в компьютер и сохраняются в файле в виде таблицы.

Измерения проводите до тех пор, пока температура в шкафу изменяется.

Остановите измерения, нажав левой клавишей мыши на кнопку **Останов** (см. рис. 38) и закройте окно программы SysView. Выключите тумблером сушильный шкаф и питание стенда выключателем QF.

Отыщите в папке c:\Sosna_003MD\SysView2\ файл с именем 307_080917 COM1 Прибор1.txt и откройте его двойным щелчком левой клавишей мыши по имени файла. Проверьте файл на наличие строк со словами **нет ответа**. Вручную замените такие записи на подходящие по смыслу значения измеряемой температуры. Далее нужно заменить имеющиеся в файле запятые, отделяющие целую часть числа от дробной, на точки. Для этого выполните команду меню **Правка→Заменить...**, в появившемся диалоговом окне **Замена** в поле **Что** введите запятую, а в поле **Чем** – точку, и нажмите кнопку **Заменить все**.

Сохраните файл в вашей рабочей папке под новым именем. Для этого выполните команду меню **Файл→Сохранить как...**, в появившемся диалоговом окне следует указать папку c:\MATLAB6p5\work\..., в которой будет храниться файл (вместо многоточия указать название вашей рабочей папки), а в строке **Имя файла** – указать имя файла с расширением .txt. Имя файла необходимо набирать английскими символами без пробелов. В качестве имени файла, например, можно задать фамилию студента, выполняющего лабораторную работу. После ввода имени файла левой клавишей мыши нажмите кнопку **ОК**.

Построение в пакете MATLAB экспериментальной переходной характеристики сушильного шкафа

Выполните запуск MATLAB (см. выполнение лабораторной работы № 1). В появившемся главном окне программы MATLAB выберите пункт меню **File→New→M-file**. В результате на экране появится окно (с предлагаемым по умолчанию названием **Untitled**) для ввода последовательности команд M-файла. В данном окне с клавиатуры введите следующий текст программы, выполняющей построение графика переходной функции:

```
clear all;  
close all;  
clc;  
experiment_data=load('c:\MATLAB6p5\work\...\txt');
```

```

% загрузка файла с массивом данных эксперимента –
% вместо многоточия введите путь к файлу и имя
% сохраненного рабочего файла
y = experiment_data( : , 3 ); % данные изменения температуры -
                               % 3-й столбец загруженного массива
N = length(y); % длина массива значений температуры
y = y - y(1); % вычитание начального значения температуры
Dt = 5; % интервал опроса
t_beg = 0; % начальное значение времени
t_end = Dt*(N-1); % конечное значение времени
t = [t_beg : Dt : t_end ]';
% массив моментов времени, в которые производились
% измерения температуры
U = 220;
u = U*ones(size(y));
% управляющее воздействие - изменение напряжения
% на нагревательном элементе сушильного шкафа
%-----
% построение графика переходной функции сушильного
% шкафа
figure(1);
hold on;
plot( t, y, 'k', 'LineWidth', 2 );
% задание масштаба графика по осям x и y
axis( [ t_beg (t_end+10) 0 100] );
grid on; % отображать сетку графика
xlabel( '\litt, c' ); % подпись по оси x
ylabel( '\lity}{\litt}, c' ); % подпись по оси y
Y_st = y(N); % установившееся значение переходной функции
plot( t, Y_st*ones(size(t)), 'b--', 'LineWidth', 0.5);
legend( '\lity}{\litt}' , '\lity}_s_t' );

```

Сохраните введенную программу, выбрав в меню окна редактирования модели `untitled` пункт `File→Save as...` После ввода имени файла левой кнопкой мыши нажмите кнопку **Сохранить**.

Произведите запуск и выполнение набранной программы клавишей `F5`, либо в окне с программой выберите пункт меню `Debug→Run`.

В результате выполнения набранной последовательности команд на экране появится окно Figure No. 1, содержащее график экспериментальной переходной функции сушильного шкафа.

Примерный вид полученного графика показан на рис. 39.

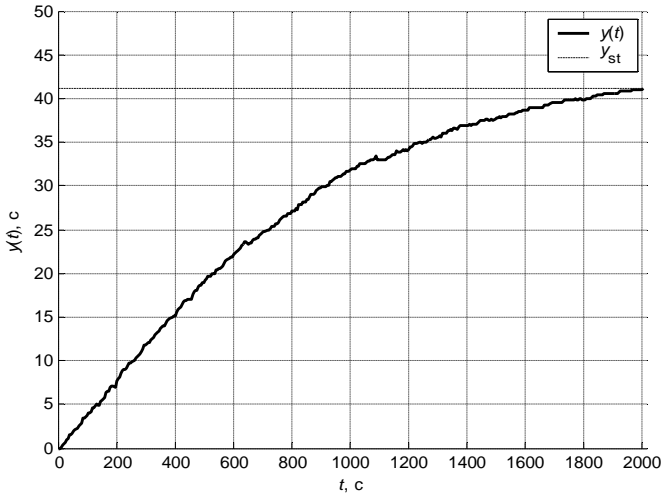


Рис. 39. График экспериментальной переходной характеристики сушильного шкафа

Полученный график включите в отчет.

2. Проведение идентификации звена по виду переходной характеристики

Выбор звена, которым описывается сушильный шкаф и определение значений его параметров

Сравнивая полученный график экспериментальной переходной характеристики с графиками переходных функций, приведенными во втором столбце табл. 5, определите, на какой из них наиболее похож полученный график.

Выпишите из первого столбца табл. 5 название этого звена и общий вид его переходной и передаточной функций.

Путем графоаналитической обработки экспериментальной переходной функции (как показано в табл. 5) оцените значения

параметров выбранного звена (постоянных времени и, при наличии, времени запаздывания).

Таблица 5

Математические выражения и графики переходных функций наиболее распространенных на практике линейных динамических звеньев

Апериодическое звено 1-го порядка	
<p>Передаточная функция:</p> $W(s) = \frac{K}{T s + 1};$ <p>переходная функция:</p> $h(t) = K \left(1 - e^{-t/T} \right)$	
Апериодическое звено 1-го порядка с чистым запаздыванием	
<p>Передаточная функция:</p> $W(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{T s + 1};$ <p>переходная функция:</p> $h(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < \tau, \\ K \left(1 - e^{-(t-\tau)/T} \right), & \text{при } t \geq \tau \end{cases}$	
Апериодическое звено 2-го порядка	
<p>Передаточная функция:</p> $W(s) = \frac{K}{(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)};$ <p>переходная функция:</p> $h(t) = K \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-t/T_3} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-t/T_4} \right),$ <p>при $T_3 > T_4$</p>	

Значения постоянной времени находятся путем построения касательных к графику: в начале координат – для апериодического звена первого порядка, в точке начала изменения выходной величины – для апериодического звена первого порядка с запаздыванием, в точке перегиба – для апериодического звена второго порядка.

Коэффициент передачи K рассчитывается по формуле

$$K = \frac{Y_{уст}}{u_{вх}}, \quad (45)$$

где $Y_{уст}$ – изменение температуры в сушильном шкафу при нагреве, °С;

$u_{вх}$ – изменение входного воздействия, т. е. напряжения, подаваемого на нагревательный элемент при включении сушильного шкафа, $u_{вх} = 220$ В.

Например, если для построенного графика принято решение о том, что исследуемое звено описывается апериодическим звеном первого порядка, то после дополнительных построений (рис. 40) будет получено, что значение постоянной времени звена $T = 1000$ с.

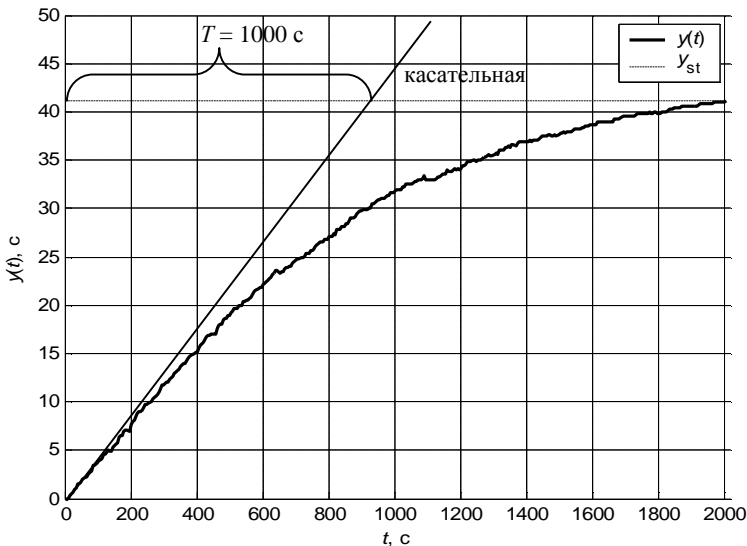


Рис. 40. Графоаналитическое определение параметров звена

Для расчета коэффициента передачи найдем по графику установившееся значение выходной величины – 41 °С. Получим

$$K = \frac{41}{220} \approx 0,186 \text{ } ^\circ\text{C/V},$$

т. е. с ростом величины входного напряжения на 1 В значение установившейся температуры увеличится на 0,186 °С.

Рассчитайте по формуле (45) значение коэффициента передачи.

Построение графика расчетной переходной характеристики сушильного шкафа

В окне MATLAB с набранной программой построения графика добавьте следующий текст:

```
% построение графика расчетной переходной функции
% коэффициент преобразования входного сигнала
% в выходной
K = Y_st/U;
```

Коэффициент преобразования входного сигнала в выходной (изменение напряжения на нагревательном элементе в изменение температуры внутри шкафа) будет общим параметром, одинаковым для любого из трех рассматриваемых динамических звеньев.

Далее выберите и добавьте строки **в зависимости от выбранного типа звена**:

а) Если по графику установлено, что экспериментальная переходная функция соответствует **апериодическому звену 1-го порядка**, введите значение постоянной времени и математическую формулу для переходной функции звена (после символов $T =$ нужно ввести рассчитанное по графику значение постоянной времени).

```
% для апериодического звена 1-го порядка
```

```
T = ; % постоянная времени, сек.
```

```
h = K*U*(1 - exp(-t/T)); % расчетная переходная функция
```

б) Если экспериментальная переходная функция соответствует **апериодическому звену 1-го порядка с запаздыванием**, введите значения постоянной времени, времени запаздывания, и математическую формулу для переходной функции звена (после символов $T =$ и $\tau =$ нужно ввести определенные по графику

значения постоянной времени и времени запаздывания, соответственно):

% для апериодического звена 1-го порядка с запаздыванием

T = ; % постоянная времени, сек.

tau = ; % время запаздывания, сек.

h = sign(real(t>tau))*K*U.*(1 - exp(-(t-tau)/T));

в) Если экспериментальная переходная функция соответствует **апериодическому звену 2-го порядка**, введите значения постоянных времени T_3 , T_4 и математическую формулу для переходной функции звена (после символов $T_3 =$ и $T_4 =$ нужно ввести рассчитанные по графику значения постоянных времени):

% для апериодического звена 2-го порядка

T3 = ;

T4 = ;

h = K*U*(1 - T3/(T3-T4)*exp(-t/T3) + T4/(T3-T4)*exp(-t/T4));

После этого введите команды, выполняющие построение кривой расчетной переходной функции на графике, а также определяющие максимальное расхождение (в процентах от установившегося значения управляемой величины) между расчетной и экспериментальной кривыми:

% расхождение между экспериментальной и расчетной

% кривыми в процентах от установившегося значения

delta = abs(h-y)/Y_st*100;

% максимальное расхождение кривых

[delta_max, i] = max(delta);

figure(1);

hold on;

% расчетная переходная функция сушильного шкафа

plot(t, h, 'r', 'LineWidth', 2);

plot(t(i), y(i), 'ro', t(i), h(i), 'ro');

line([t(i) t(i)], [y(i) h(i)], 'Color', 'r', 'LineWidth', 2, 'LineStyle', ':');

text(mean(t), min([y(i) h(i)]), strcat('{\delta}_m_a_x =

',num2str(round(delta_max)), ' %'),...

'FontWeight','bold', 'BackgroundColor', 'white');

Нажмите клавишу F5.

В результате на графике отобразится дополнительно кривая расчетной переходной функции выбранного звена, а также значение

максимального расхождения между расчетной и экспериментальной кривыми (рис. 41).

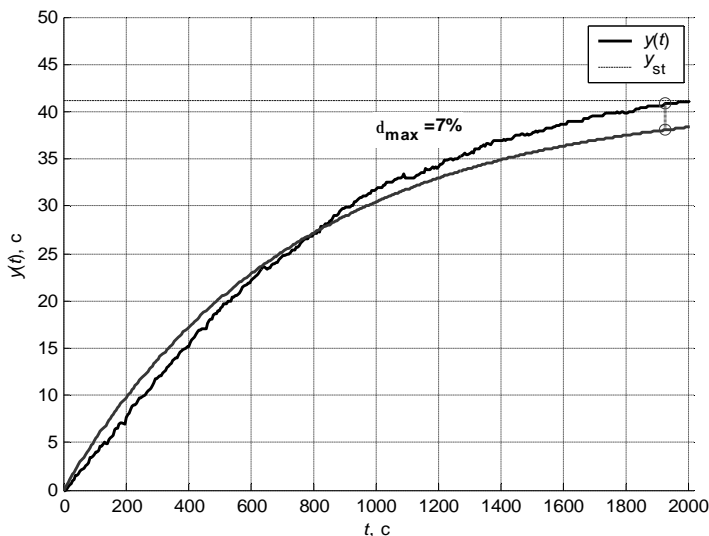


Рис. 41. Пример графика расчетной переходной характеристики с указанием значения максимального расхождения между экспериментальной и расчетной характеристиками

Если по графику получено, что максимальное расхождение между экспериментальной и расчетной характеристиками составляет более 5 %, следует внести изменения в М-файл: подобрать другие параметры звена (или изменить тип звена) и повторить построение графика, добиваясь, чтобы максимальное расхождение не превысило значения 5 %.

Полученный график, с указанием максимального расхождения между расчетной и экспериментальной переходными характеристиками, включить в отчет.

Для найденных оптимальных параметров звена (для которых максимальное расхождение между экспериментальной и расчетной переходными характеристиками составило не более 5 %) записать переходную и передаточную функции звена, описывающего нагрев сушильного шкафа, подставив найденные значения параметров, с указанием типа звена.

3. Проведение идентификации звена с использованием инструмента System Identification пакета MATLAB

Расчет теоретических переходных характеристик сушильного шкафа путем компьютерной идентификации

Для решения задач идентификации динамических объектов в программе MATLAB-Simulink предназначен специальный раздел – System Identification (Идентификация систем).

Для запуска раздела System Identification необходимо в MATLAB в окне ввода команд Command Window в командной строке (справа от знака >>) набрать слово `ident` и нажать Enter.

В результате на экране появится окно графического интерфейса раздела System Identification, вид которого показан на рис. 42.

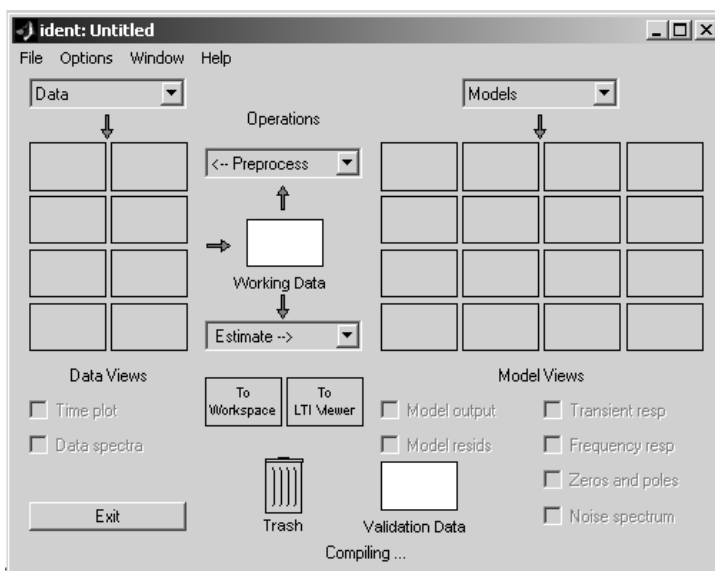


Рис. 42. Вид окна графического интерфейса раздела System Identification

Зададим в качестве моделей звеньев, описывающих нагрев сушильного шкафа, последовательно аperiodические звенья первого и второго порядков и для каждого из них получим график расчетной переходной характеристики сушильного шкафа путем компьютерной идентификации.

Укажите исходные данные для выполнения идентификации. Для этого в левом верхнем углу окна в выпадающем списке Data (Данные) выберите вариант Import.

Это приведет к открытию диалогового окна, показанного на рис. 43. Введите в нем имя u в поле Input (Вход), y – в поле Output (Выход), в поле Starting time (Начальный момент времени) введите 0, а в поле Samp. interv. (Интервал дискретизации) введите выбранное при проведении эксперимента значение интервала опроса (5 с), в строке Data Name (Имя данных) укажите произвольное название (например, Heater).

Нажмите кнопку Import. Далее нажатием кнопки Close (Закрыть) закройте окно импорта данных.

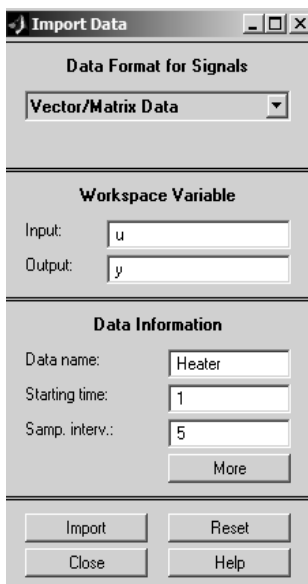


Рис. 43. Диалоговое окно импорта данных

Указанные действия приведут к появлению в верхнем левом углу окна интерфейса значка в виде цветной линии, сопровождаемого надписью Heater (рис. 44). Это означает, что импортируемые данные введены в среду интерфейса. Сообщения об этих данных также появляются в значках Working Data (Рабочие данные) и Validation Data (Данные для проверки модели).

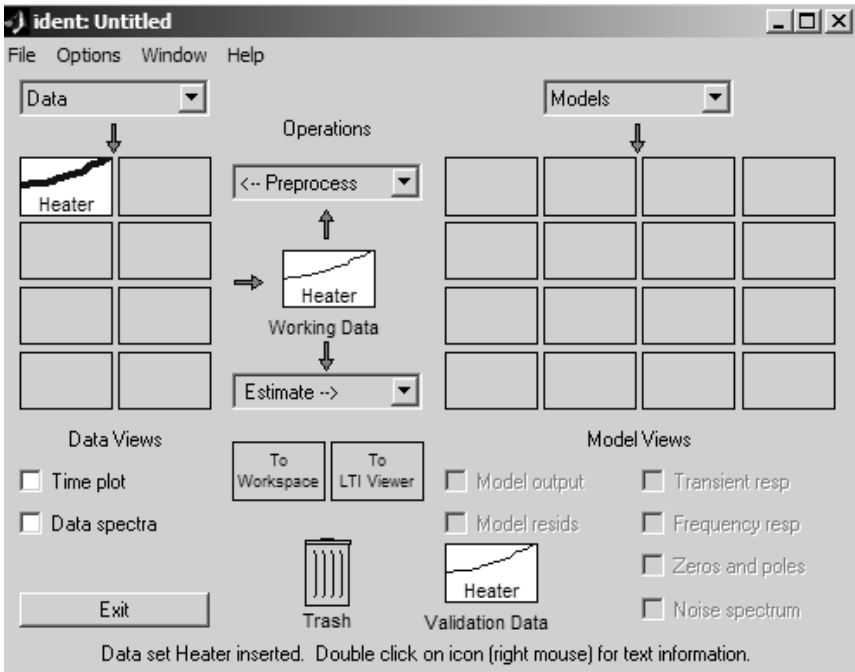


Рис. 44. Окно графического интерфейса раздела System Identification с загруженными данными

Для нахождения передаточной функции объекта вначале необходимо указать вид математической модели объекта. Так как начальными данными являются входной сигнал u и выходной сигнал y исследуемого объекта, а также различные шумы, всегда присутствующие при экспериментальных измерениях, то следует выбрать модель типа «вход–выход» (по-английски Output–Error, т. е. «выход–ошибка», сокращенно ОЕ):

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t - nk) + e(t),$$

где $B(z) = b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb}$;

$F(z) = 1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots + f_{na} z^{-na}$;

$e(t)$ – дискретный белый шум.

В окне **ident: Untitled** интерфейса идентификации в выпадающем списке **Estimate** (Оценивание) выберите вариант **Parametric models...** (так как оцениваются значения параметров передаточной функции объекта), что приведет к появлению диалогового окна, показанного на рис. 45.

В данном окне в выпадающем списке **Structure** выберите пункт **OE:[nb nf nk]**, соответствующий модели «вход–выход».

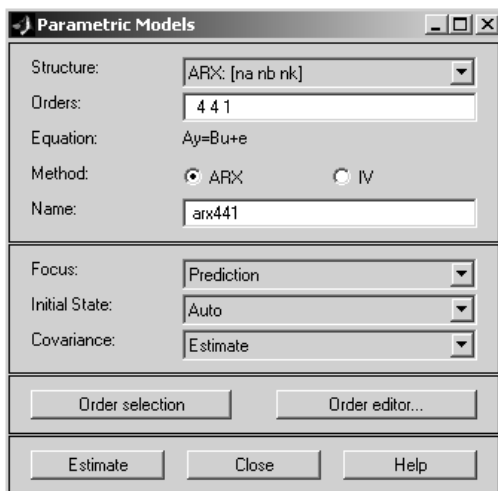


Рис. 45. Диалоговое окно задания параметрической модели

Далее необходимо задать порядок модели – целочисленные значения nb , nf и nk , определяющие, соответственно, порядок полиномов $B(z)$ и $F(z)$, а также интервал времени чистого запаздывания.

Для задания значений, соответствующих апериодическому звену 1-го порядка: $nf = 1$, $nb = 1$, $nk = 1$, нажмите кнопку **Order Editor** (Редактор порядка модели) и в появившемся диалоговом окне (рис. 46) во всплывающих списках **Poles** (Число полюсов передаточной функции), **Zeros + 1** (Число нулей передаточной функции + 1) и **Delay** (Запаздывание, выраженное числом интервалов дискретизации) выберите, соответственно, значения $nf = 1$, $nb = 1$, $nk = 1$, после чего нажмите кнопку **Close** (Заккрыть).

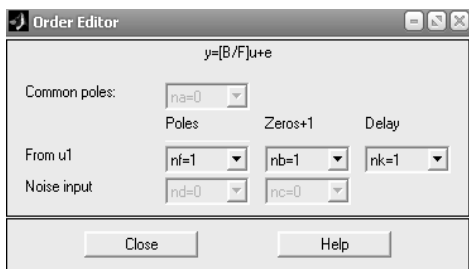


Рис. 46. Диалоговое окно задания порядка параметрической модели

В диалоговом окне Parametric models... в поле Orders (Порядок модели) появятся три единицы, а в поле Name (Имя модели) – заданное автоматически имя oe111.

Для оценки передаточной функции объекта нажмите кнопку Estimate (Оценить).

В результате в основном окне интерфейса ident: Untitled в его правой части Model Views (Вид моделей) появится значок с надписью oe111, означающий, что выбранная модель построена.

Установите флажок Model Output (Выход модели).

В появившемся окне (рис. 47) будут получены две кривые: экспериментальная и рассчитанная теоретически для выбранной модели. В правой части окна показывается степень совпадения (Best fits) рассчитанной кривой графика с экспериментальной (на рис. 47 это значение равно 95,3741 %). Значение 100 % соответствует точному совпадению.

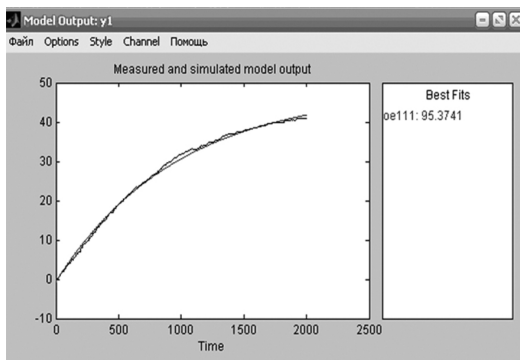


Рис. 47. График теоретической переходной характеристики апериодического звена первого порядка с указанием степени совпадения с экспериментальной

Задайте теперь в качестве модели апериодическое звено 2-го порядка. Для этого в диалоговом окне **Parametric models...** нажмите кнопку **Order Editor** и в появившемся диалоговом окне в выпадающем списке **Poles** задайте значение $nf = 2$, ячейки **Zeros + 1** и **Delay** оставьте без изменения: $nb = 1$, $nk = 1$; после чего нажмите кнопку **Close** (Заккрыть).

В результате в диалоговом окне **Parametric models...** в поле **Orders** появятся значения 1, 2, 1, а в поле **Name** – заданное автоматически имя модели **oe121**.

Для оценки передаточной функции объекта нажмите кнопку **Estimate** (Оценить).

В результате в основном окне интерфейса **ident: Untitled** в правой части **Model Views** появится значок построенной модели **oe121**, а в окне **Model Output** – еще одна рассчитанная кривая, соответствующая модели **oe121**, и для нее также будет указана степень совпадения с экспериментальной кривой (рис. 48).

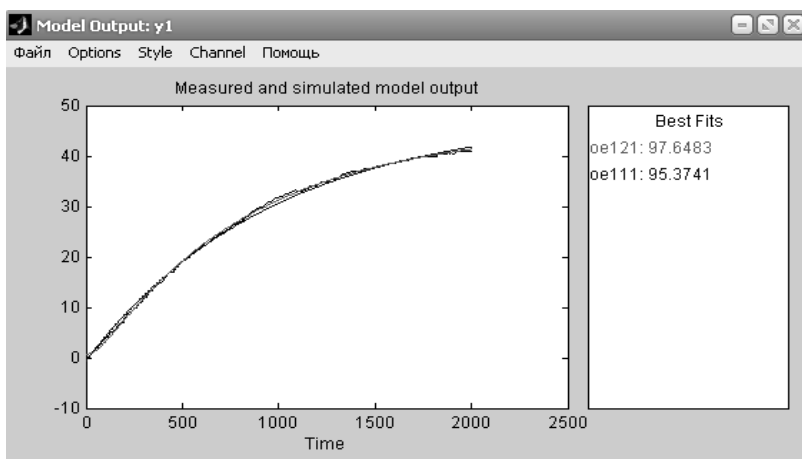


Рис. 48. График теоретических переходных характеристик апериодических звеньев первого и второго порядка с указанием степени совпадения с экспериментальной

Сравнив оба значения, можно сделать вывод, что более точное совпадение с экспериментальными данными обеспечивает модель апериодического звена 2-го порядка.

Получение выражения для передаточной функции звена, полученного в результате компьютерной идентификации

Преобразуйте полученную модель `oe121` в передаточную функцию. Для этого скопируйте построенную модель `oe121` из окна интерфейса идентификации в рабочее пространство переменных MATLAB: в окне интерфейса `ident: Untitled` в правой части `Model Views` нажмите на значке модели `oe121` левой клавишей мыши и перетащите его на значок `To Workspace` (В рабочее пространство), расположенный в этом же окне по центру.

В результате в основном окне MATLAB на вкладке `Workspace` появится соответствующая строка с указанием имени переменной модели (`oe121`), ее размера и типа – `idpoly object` (Объект модели).

Данная идентификационная модель является дискретной. Это связано с тем, что, как было показано выше, при передаче сигнала датчика температуры на компьютер в измерителе СОСНА-003МД выполняется его аналого-цифровое преобразование, т. е. преобразование из аналоговой (непрерывной) в цифровую (дискретную) форму.

Поэтому сначала необходимо выполнить обратное преобразование дискретной модели в непрерывную с помощью функции MATLAB `d2c()`, (`digital-to-continuous`).

В окне команд `Command Window` основного окна MATLAB в командной строке (справа от знака `>>`) введите команду:
`>> continuous_oe121 = d2c(oe121)`

В результате в MATLAB будет выполнено преобразование дискретной модели в непрерывную и отображена информация следующего вида:

Continuous-time IDPOLY model: $y(t) = [B(s)/F(s)]u(t) + e(t)$

$B(s) = 1.367e-005 s + 9.172e-006$

$F(s) = s^2 + 0.01272 s + 2.599e-005$

Estimated using PEM from data set Шкаф суш.

Loss function 0.192328 and FPE 0.193385

Далее необходимо преобразовать непрерывную модель в передаточную функцию.

В командной строке MATLAB введите команду
`>> trfunc_oe121 = tf(continuous_oe121, 'measured')`

Функция MATLAB `tf()` преобразует объект модели (типа `idpoly object`) в передаточную функцию (в объект типа `tf – transfer function`). В результате будет получено выражение для передаточной функции исследуемого объекта.

Запишите в отчет полученную передаточную функцию.

Расчет постоянных времени передаточной функции звена, полученного в результате компьютерной идентификации

Для найденной передаточной функции определите, чему равны значения постоянных времени T_3 , T_4 апериодического звена 2-го порядка. Для этого сначала определите корни знаменателя передаточной функции.

```
В командной строке MATLAB введите следующие команды:  
>> denominator = trfunc_oe121.den{1} % знаменатель  
>> r = roots(denominator) % корни знаменателя  
>> T3 = -1/r(2)  
>> T4 = -1/r(1)
```

Сравните полученные значения постоянных времени со значениями T_3 , T_4 , определенными ранее по графику.

Построение графика переходной функции сушильного шкафа, полученной в результате компьютерной идентификации

В окне команд `Command Window` в командной строке введите следующие команды:

```
>> y_id = sim(u, oe121);  
>> figure(1);  
>> plot(t, y_id, 'g', 'LineWidth', 2);
```

В результате в окне `Figure No. 1` будет построен график.

4. Сделайте выводы о соответствии передаточных функций, полученных в результате расчетов и компьютерной идентификации

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. График экспериментальной переходной функции сушильного шкафа.

3. График расчетной переходной функции сушильного шкафа с указанием максимального расхождения между расчетной и экспериментальной кривыми.

4. Формулы расчетных передаточной и переходной функций сушильного шкафа с указанием типа звена.

5. График переходной функции сушильного шкафа, полученный в результате компьютерной идентификации, с указанием максимального расхождения между расчетной и экспериментальной кривыми.

6. Передаточная функция сушильного шкафа, полученная в результате компьютерной идентификации, и значения постоянных времени звена.

7. Выводы о соответствии передаточных функций, полученных в результате расчетов и компьютерной идентификации.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение идентификации.
2. Почему возникает задача идентификации?
3. Изложите методику идентификации линейных объектов по переходной функции.
4. Как понять, что идентификация произведена успешно? Что делать в противном случае?
5. Запишите дифференциальное уравнение, которым описывается сушильный шкаф.

МОДУЛЬ 2. ЛИНЕЙНЫЕ НЕПРЕРЫВНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗОМКНУТОГО И ЗАМКНУТОГО УПРАВЛЕНИЯ

Цель работы: ознакомиться с принципом действия систем автоматического управления (САУ) разомкнутого и замкнутого типа. Изучить принцип действия системы автоматического управления на основе температурной зависимости.

Задание:

1. Собрать схему для исследования температурной зависимости.
2. Исследовать влияние нагрева на величину сопротивления терморезистора.
2. Построить разомкнутую систему автоматического регулирования и исследовать ее работу.
3. Построить замкнутую систему автоматического регулирования и исследовать ее работу.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

В работе используется специализированный учебный стенд «НТЦ-09.11 Основы автоматизации». Корпус стенда состоит из стола и жестко соединенной с ним настольной приставки с лицевой панелью, на которой изображена принципиальная электрическая схема и установлена коммутационная и исследуемая аппаратура.

Питание стенда осуществляется от однофазной сети 220 В 50 Гц. Потребляемая мощность не более 200 Вт.

Принципиальная электрическая схема на лицевой панели стенда, для удобства выполнения работ, разделена на функциональные блоки. На лицевой панели расположены:

- тумблер включения питания стенда;
- индикатор наличия сетевого напряжения;
- выводы блоков питания +5 В, +12 В, -12 В;
- индикаторы наличия напряжения на выходах;
- исследуемые механизмы и элементы;

- двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянного магнита с закрепленным на валу датчиком частоты вращения;
- нагревательный элемент в виде проволочного резистора, с закрепленным на нем термосопротивлением.

На панели установлены коммутационные гнезда, коммутационная аппаратура, а также органы управления, позволяющие изменять параметры элементов при проведении лабораторной работы.

Для сборки исследуемых схем используются перемычки, при помощи которых производится коммутация соответствующих гнезд, выведенных на лицевую панель стенда (рис. 49).

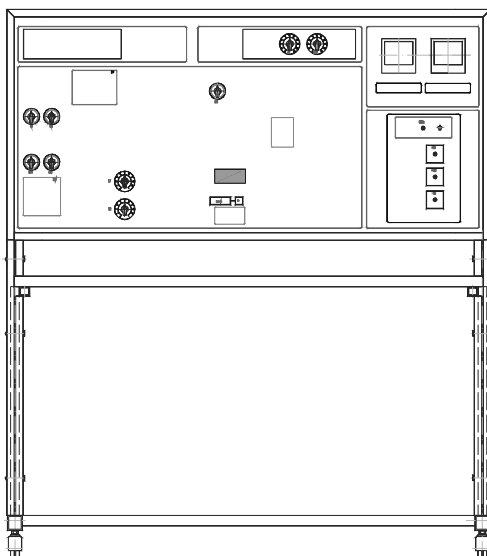


Рис. 49. Лицевая панель лабораторного стенда

Необходимые измерения производятся с помощью сигнальных светодиодов, мультиметра, осциллографа.

Выполнение работы

1. Исследование температурной зависимости

Соберите схему, в которой аналоговый сигнал преобразуется в сигнал, который при допустимых значениях термосопротивления

имеет значение 1, а при превышении величины заданного сопротивления значение 0 (рис. 50).

В схему входят: терморезистор Т, резистор R2, переменный резистор R4, операционный усилитель CA1, логический элемент D1.1 и сигнальная лампа накаливания Н2.

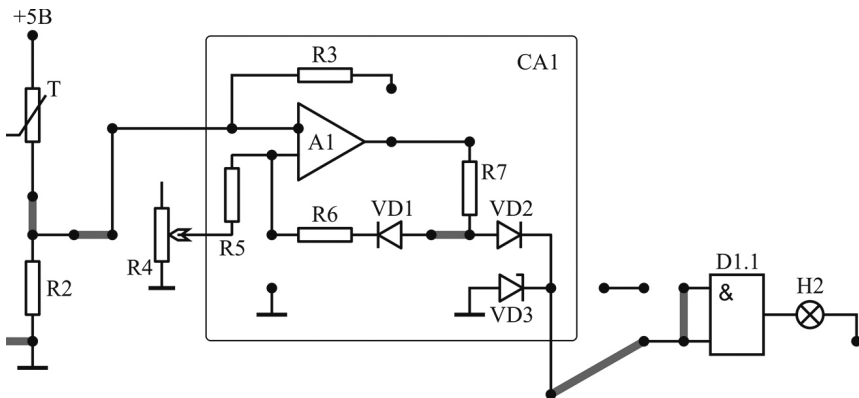


Рис. 50. Общий вид исследуемой схемы

Основная часть элементов, используемых при сборке этой схемы, расположена с левой стороны стенда. Для сборки схемы:

– с помощью перемычки соедините входы логического элемента D1.1 (рис. 51);

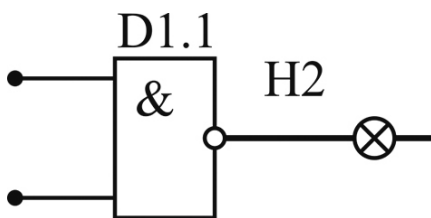


Рис. 51. Внешний вид логического элемента D1.1

– с помощью перемычки соедините выход операционного усилителя CA1 (рис. 52) с входом логического элемента D1.1;
 – с помощью перемычки организуйте обратную связь в операционном усилителе CA1;

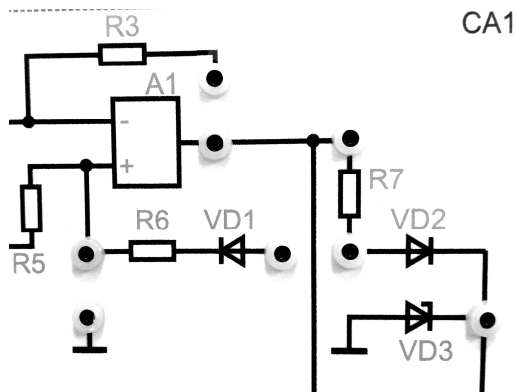


Рис. 52. Внешний вид функционального блока CA1

– с помощью длинной перемычки соедините терморезистор Т (расположен на стенде справа, внешний вид показан на рис. 53) и резистор R2;

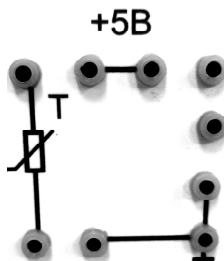


Рис. 53. Внешний вид коммутационных гнезд терморезистора и источника питания 5 В

– подключите перемычкой терморезистор Т к источнику питания 5 В (см. рис. 53);
 – перемычкой соедините резисторы R2 и Т со входом операционного усилителя CA1.

Включите питание стенда и электрической схемы тумблером SA3.

Вращая ручку переменного сопротивления R4 (рис. 54), убедитесь в том, что при увеличении значения переменного сопротивления R4 лампочка H2 загорается, а при уменьшении – гаснет.

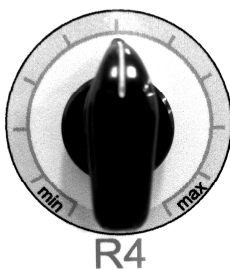


Рис. 54. Переключатель переменного сопротивления R4

Поясните, почему так происходит.
 Выключите стенд, отсоедините терморезистор Т от сети питания и от резистора R2.

2. Исследование влияния нагрева на величину сопротивления терморезистора

С помощью мультиметра измерьте и запишите значение сопротивления терморезистора Т при комнатной температуре.

С помощью перемычек подключите нагревательный элемент ЕК (выходы нагревательного элемента ЕК расположены на стенде справа, рядом с выходами терморезистора Т, внешний вид показан на рис. 55) к питающей сети 15 В.

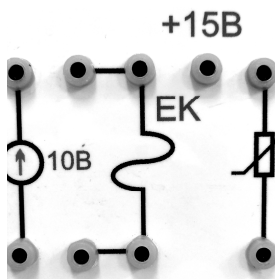


Рис. 55. Внешний вид коммутационных гнезд нагревательного элемента

При подключении нагревательного элемента ЕК происходит нагрев терморезистора, т. к. терморезистор расположен в непосредственной близости от нагревательного элемента на стенде (взаимное расположение показано на рис. 56).



Рис. 56. Внешний вид нагревательного элемента и терморезистора

Подключите мультиметр для измерения сопротивления терморезистора (полученная схема показана на рис. 57).

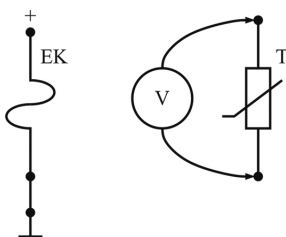


Рис. 57. Схема для исследования сопротивления терморезистора

Измерьте зависимость сопротивления терморезистора от времени. Для этого включите стенд и снимите показания мультиметра через каждые 5 с. Результаты измерений занесите в табл. 6.

Таблица 6

Данные для построения переходной характеристики терморезистора

$t, \text{с}$	$R, \text{Ом}$
0	
5	
10	
...	...

Выключите стенд.

Остудите терморезистор Т до исходного значения сопротивления.

Постройте переходную характеристику терморезистора.

3. Исследование разомкнутой системы автоматического регулирования

Соберите схему, изображенную на рис. 58 (можно не использовать переменный резистор R1). Для этого, не отключая нагревательный элемент ЕК от сети питания, восстановите схему, собранную при выполнении пункта 1 данной работы. Установите значение переключателя R4 в центральное положение (см. рис. 54). Тем самым задается требуемое значение температуры.

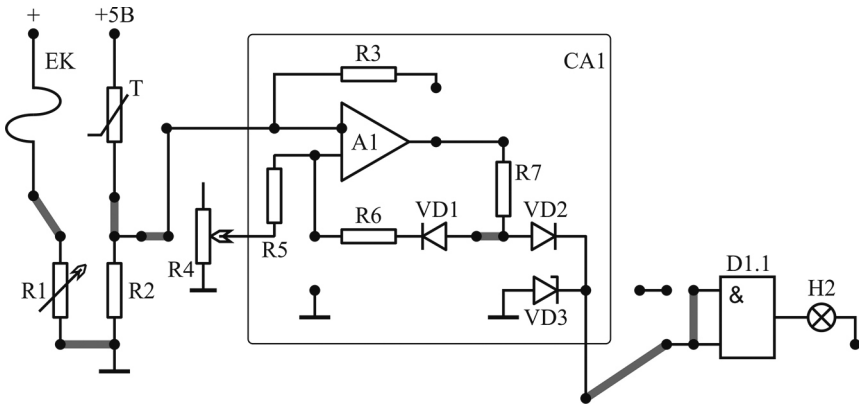


Рис. 58. Общий вид схемы исследуемой разомкнутой системы регулирования

В собранной схеме аналоговый сигнал датчика температуры преобразуется в сигнал, который при допустимых значениях температуры имеет значение 1, а при превышении температуры – значение 0.

Включите стенд, начнется нагрев терморезистора Т. При включении стенда сигнальная лампа Н2 должна гореть. Убедитесь в том, что при нагревании терморезистора Т выше температуры, определенной положением переключателя переменного сопротивления R4, лампа накаливания Н2 погаснет.

Выключите стенд. Остудите терморезистор T до исходного значения сопротивления.

Функциональная схема системы – это наглядное графическое изображение системы в виде взаимосвязанных элементов, выполняющих определенную функцию.

Элементы функциональной схемы изображаются прямоугольниками, связи между ними указываются линиями со стрелками, соответствующими направлению прохождения сигнала. Вместо термина «сигнал» используют также термин «переменная», «входное воздействие» и «выходная величина».

Наименование функционального элемента в сокращенной форме указывается внутри соответствующего прямоугольника. Над линиями связи указывают обозначение сигнала. Под схемой или в тексте сокращения и обозначения расшифровываются.

Для того, чтобы изобразить функциональную схему изучаемой разомкнутой системы автоматического регулирования, следует определить отдельные элементы устройства и их функциональное назначение.

В общем случае *система автоматического управления* имеет структуру, изображенную на рис. 59.

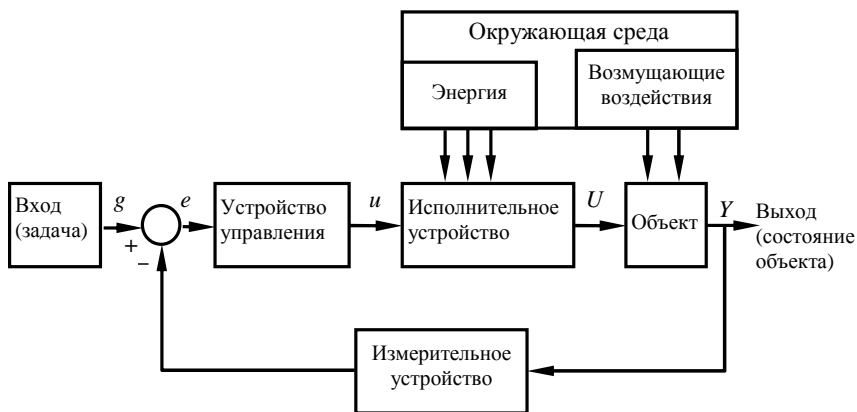


Рис. 59. Общая структура системы автоматического управления

Физический сигнал Y о состоянии объекта управления по каналу обратной связи поступает на измерительное устройство (датчик,

в качестве которого может выступать термopapa, терморезистор, датчик уровня, скорости и др. для разных систем), которое выдает информационный сигнал на *устройство сравнения*, где он сравнивается с *входным значением (заданным уровнем сигнала, задатчиком, уставкой)* управляемого параметра. При отклонении управляемого параметра от заданной величины возникает *сигнал рассогласования (сигнал ошибки) e* , поступающий в *устройство управления (регулятор)*, которое по заложенному в нем алгоритму обрабатывает информацию и вырабатывает *сигнал управления u* , который поступает на вход *исполнительного устройства*. Исполнительное устройство состоит из исполнительного механизма (это может быть электромотор с редуктором, пневмоцилиндры и др.) и регулирующего органа (кран, вентиль, заслонка и др.). Исполнительное устройство воспринимает маломощный сигнал управления и вырабатывает *управляющее воздействие U* , открывая определенным образом каналы передачи энергии (электрическая энергия, топливо, сжатый воздух и т. п.) от окружения к *объекту управления* (это может быть печь, электромотор, резервуар и др.).

В каждой конкретной системе указанные функциональные элементы представлены конкретными устройствами. Некоторые функциональные элементы в системе могут отсутствовать. В систему могут быть введены дополнительные устройства, такие как механизмы передачи движения, промежуточные преобразователи, устройства местной обратной связи и т. д.

Сигнал с задатчика:

– может быть постоянным для поддержания постоянства регулируемого параметра температуры, давления, уровня жидкости и т. д. (*системы стабилизации*);

– может изменяться во времени по определенной программе (*программное регулирование*);

– может изменяться во времени в соответствии с измеряемым внешним процессом (*следящее регулирование*).

В этих случаях системы автоматического управления называют **системами автоматического регулирования (САР)**.

Системы автоматического управления (регулирования) с обратной связью называются **замкнутыми системами** (или **системами управления по отклонению**), а системы без обратной связи – **разомкнутыми**.

В разомкнутых системах при формировании управляющего воздействия на объект учитывается только заданное значение регулируемой величины. Общий вид функциональной схемы разомкнутой САР показан на рис. 60.

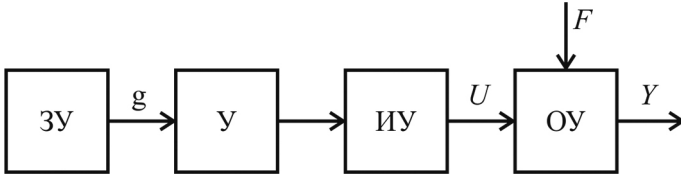


Рис. 60. Общий вид функциональной схемы разомкнутой САР:

ЗУ – задающее устройство; У – усилитель; ИУ – исполнительное устройство; g – задающее воздействие; U – управляющее воздействие; Y – выходная величина; F – возмущающее воздействие; ОУ – объект управления

В результате рассмотрения устройства и работы системы можно сделать выводы о реализованном принципе управления (в большинстве САР используется принцип управления по отклонению (по ошибке)) и о виде системы (является ли она стабилизирующей, программной, следящей).

Изобразите функциональную схему изучаемой разомкнутой системы автоматического регулирования.

Перечислите все элементы системы, опишите связи между элементами, определите функцию, выполняемую каждым элементом, составьте функциональную схему.

Опишите работу системы.

В рассматриваемом случае *объектом регулирования* является помещение, температура в котором регулируется нагревательным элементом и измеряется при помощи терморезистора, являющегося *датчиком температуры*. В качестве *регулирующего органа* выступает нагревательный элемент, при включении производящий нагрев помещения. Поскольку автоматическое отключение нагревательного элемента не предусмотрено, в данном случае имеет место разомкнутое управление.

Все остальные элементы собранной схемы: *компаратор* А1, сравнивающий сигналы, поступающие от *датчика температуры* Т и *задатчика* температуры R4, *регулирующий орган* D1.1, передающий сигнал на *индикатор*, представленный лампой накаливания Н2,

представляют собой *цепь индикации*, не влияющей непосредственно на регулирование.

Примерный вид функциональной схемы исследуемой системы разомкнутого управления показан на рис. 61.

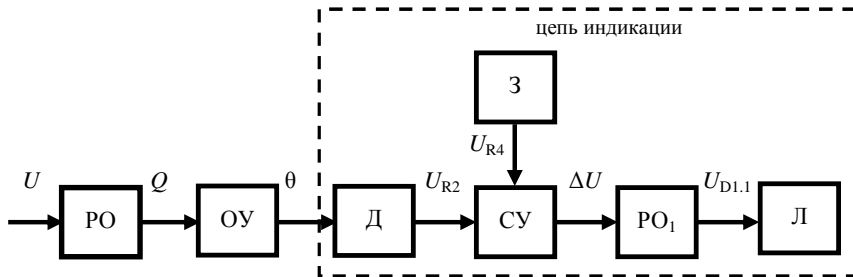



Рис. 61. Вид функциональной схемы разомкнутой системы

4. Исследование замкнутой системы автоматического регулирования

Разработайте систему автоматического управления работой двигателя на основе температурной зависимости таким образом, чтобы нагрев автоматически отключался при достижении верхней предельной температуры. Обратную связь осуществите с помощью транзистора VT2 (рис. 62).

Для этого в схему, собранную при выполнении пункта 2 данной работы, внесите следующие изменения.

- поменяйте у нагревательного элемента ЕК и терморезистора Т источники питания: подключите нагревательный элемент ЕК к сети питания напряжением 5 В, а терморезистор Т к сети питания напряжением 5 В;

- отключите нагревательный элемент ЕК от коммутационного гнезда  и с помощью перемычки соедините его с выходом транзистора VT2 (расположен на стенде правее сигнальной лампы накаливания Н2);

- выход функционального блока СА1 соедините перемычкой с входом транзистора VT2.

Установите значение переключателя R4 в центральное положение (см. рис. 54). Тем самым задается требуемое значение температуры.

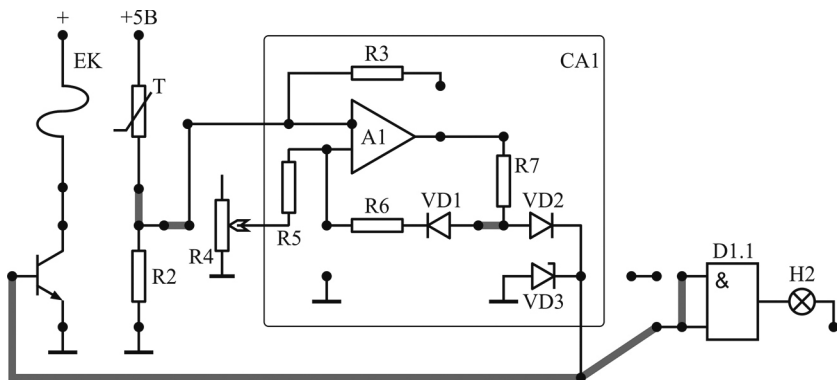


Рис. 62. Общий вид схемы исследуемой замкнутой системы регулирования

Включите стенд и убедитесь в том, что при нагревании терморезистора Т до заданной температуры нагревательный элемент ЕК отключается и терморезистор Т начинает остывать, после чего нагревательный элемент ЕК снова включается и начинает нагревать терморезистор Т.

Таким образом, происходит поддержание температуры, заданное значение которой устанавливается с помощью переменного сопротивления R4.

В данной работе *объектом управления* выступает помещение, температура в котором повышается при включении нагревательного элемента, и понижается при его выключении. Изменение температуры фиксируется с помощью терморезистора (*датчик*), сигнал с которого поступает на операционный усилитель (*компаратор*) А1, в котором происходит сравнение значений напряжения, поступающего от резистора R2, соединенного с терморезистором Т, и с резистора R4 (*задатчика*). Таким образом, с помощью датчика температуры организована обратная связь в рассматриваемой схеме.

Если полученная разность положительна, что соответствует значению температуры в помещении меньше заданного, сигнал с выхода функционального блока СА1 поступает на вход логического элемента D1.1 (*регулирующий орган* блока индикации) и на вход транзистора VT2 (*исполнительный механизм* основной цепи). При этом в цепи индикации загорается *сигнальная лампа накаливания* H2, а в основной цепи продолжается нагрев помещения

с помощью нагревательного элемента ЕК (*регулирующий орган* основной цепи воздействий).

Если же полученная разность отрицательна (значение температуры в помещении превысило заданное), сигнал на выходе функционального блока СА1 отсутствует. При этом в цепи индикации гаснет сигнальная лампа накаливания Н2, а в основной цепи происходит отключение нагревательного элемента ЕК от сети – прекращается нагрев помещения.

Примерный вид функциональной схемы построенной системы замкнутого управления показан на рис. 63.

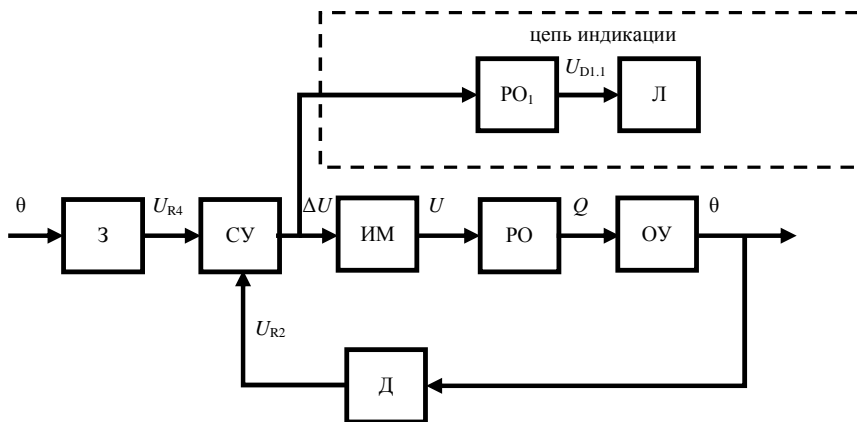


Рис. 63. Вид функциональной схемы замкнутой системы

В системе реализован принцип управления по отклонению (по ошибке). Система является стабилизирующей.

Изобразите функциональную схему изучаемой замкнутой системы автоматического регулирования на основе температурной зависимости.

Сделайте выводы о работе построенных схем.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Данные для построения экспериментальной зависимости термосопротивления от времени (табл. 6).

3. График экспериментальной переходной функции термосопротивления $R = f(t)$.

4. Функциональная схема построенной разомкнутой системы автоматического регулирования на основе температурной зависимости.

5. Функциональная схема построенной замкнутой системы автоматического регулирования на основе температурной зависимости.

7. Выводы о работе построенных схем.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные принципы управления.
2. Дайте определение функциональной схемы.
3. Перечислите основной функциональный состав систем автоматического регулирования.
4. Опишите полученные схемы.
5. Обоснуйте необходимость температурно-зависимого включения станков, приборов и установок. Какой конкретный процесс может быть смоделирован в ходе выполнения опыта?

МОДУЛЬ 3. ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ (П-ЗАКОНОМ) РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: исследовать свойства САР с П-законом регулирования.

Задание:

1. Изучить законы регулирования и показатели качества регулирования САР.
2. Построить компьютерную модель замкнутой САР с П-законом регулирования, используя пакет компьютерного моделирования Simulink.
2. Исследовать зависимость показателей качества регулирования САР от значения коэффициента усиления П-регулятора.
3. Сделать выводы о свойствах САР с П-законом регулирования.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Работа выполняется на персональных ЭВМ с использованием среды компьютерного моделирования MATLAB Simulink.

Выполнение работы

1. Изучение законов регулирования и показателей качества регулирования САР

Показатели качества регулирования САР

О качестве регулирования САР судят по графику ее *переходной функции*, т. е. по реакции системы на единичное ступенчатое изменение задающего или возмущающего воздействия, полученному экспериментально либо путем компьютерного моделирования.

Для численной характеристики точности САР используют 4 основных *показателя качества* (рис. 64).

1) **Установившаяся (статическая) ошибка регулирования** – это разность между заданным значением управляемой величины

и ее установившимся значением после окончания процесса регулирования:

$$e_{\text{СТ}} = y_{\text{ЗАД}} - y_{\text{УСТ}} \cdot \quad (46)$$

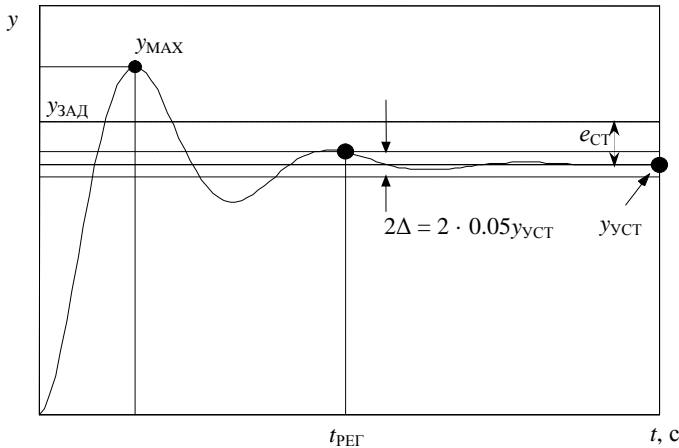


Рис. 64. Переходная функция САР по задающему воздействию:

$y_{\text{ЗАД}}$ – заданное значение управляемой величины;

$y_{\text{УСТ}}$ – установившееся (статическое) значение управляемой величины;

$t_{\text{РЕГ}}$ – время регулирования;

$y_{\text{МАХ}}$ – наибольшее отклонение регулируемой величины в переходном процессе

2) Перерегулирование:

$$\sigma = \frac{y_{\text{МАХ}} - y_{\text{УСТ}}}{y_{\text{УСТ}}} 100 \% \cdot \quad (47)$$

Выражение в числителе формулы для определения перерегулирования называют **динамической ошибкой регулирования** – это максимальное в процессе регулирования отклонение регулируемого параметра от конечного состояния равновесия. На графике рис. 64 динамическая ошибка равна разности:

$$e_{\text{Д}} = y_{\text{МАХ}} - y_{\text{УСТ}} \cdot \quad (48)$$

3) Время регулирования – это отрезок времени с момента начала регулирования (момент, когда произошло внешнее задающее

или возмущающее воздействие) до момента, когда отличие регулируемого параметра от конечного состояния равновесия $y_{уст}$ становится не более $\pm 5\%$ от конечного значения $y_{уст}$ (либо от величины динамической ошибки e_d в случае, если конечное значение $y_{уст} = 0$).

4) Интегральный показатель качества J – определяется по следующей формуле:

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt. \quad (49)$$

Данный показатель качества служит обобщением сразу трех предыдущих показателей. Чем меньше перерегулирование, статическая ошибка и время регулирования, тем меньше значение интеграла J и выше качество работы САР.

Законы регулирования САР

Устройство управления, называемое также ***регулятором***, выполняет основные функции управления, путем выработки сигнала управления u в зависимости от ошибки, т. е. $u = u(e)$.

Ошибкой регулирования (рассогласованием) называется разность между заданным значением управляемой величины и ее фактическим значением в момент времени t :

$$e(t) = y_{зад}(t) - y(t). \quad (50)$$

В ***установившемся режиме***, соответствующем номинальным значениям задающего и возмущающего воздействий ($y_{зад} = y_{зад0}$ и $F = F_0$), значение управляемой величины $y = y_{зад0}$ и, соответственно, значение ошибки равно нулю ($e = 0$).

При изменении задающего или возмущающего воздействия на входах системы, значение управляемой величины также изменяется. В системе появляется ошибка регулирования $e(t) \neq 0$ и происходит процесс регулирования, в результате которого ошибка $e(t)$ уменьшается.

Изменение ошибки регулирования $e(t)$ связано с изменением задающего и возмущающего воздействий следующим выражением:

$$e(s) = W_{e_y}(s) y_{зад}(s) + W_{e_F}(s) F(s), \quad (51)$$

где $W_{e_y}(s)$ – передаточная функция ошибки САР по задающему воздействию:

$$W_{e_y}(s) = \frac{e(s)}{y_{зад}(s)} = \frac{1}{W_0(s)W_{OC}(s)+1}; \quad (52)$$

$W_{e_F}(s)$ – передаточная функция ошибки САР по возмущающему воздействию:

$$W_{e_F}(s) = \frac{e(s)}{F(s)} = \frac{W_F(s)}{W_0(s)W_{OC}(s)+1}; \quad (53)$$

$W_0(s)$ – передаточная функция прямой ветви структурной схемы САР;

$W_{OC}(s)$ – передаточная функция цепи обратной связи;

$W_F(s)$ – передаточная функция возмущающего воздействия на объект управления.

Закон регулирования – это математическая зависимость между сигналом рассогласования (ошибкой) $e(t)$ и управляющим воздействием на объект $U(t)$ без учета инерционности регулятора и элементов исполнительного устройства:

$$U(t) = f(e(t)). \quad (54)$$

Закон регулирования определяет основные качественные и количественные характеристики системы.

Различают *линейные* и *нелинейные* законы регулирования. Кроме того, эти законы могут быть реализованы в *непрерывном* виде или в *цифровом*. Цифровые законы регулирования реализуются путем построения регуляторов с помощью средств вычислительной техники (микроЭВМ или микропроцессорных систем).

В инженерной практике наибольшее применение имеют *типовые линейные законы регулирования*: пропорциональный (П), интегральный (И), пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД).

Пропорциональный закон (П-закон) регулирования САР

При пропорциональном законе регулирования математическая зависимость между сигналом ошибки $e(t)$ и управляющим воздействием на объект $U(t)$ имеет следующий вид:

$$U(t) = K_p e(t). \quad (55)$$

Соответственно, передаточная функция регулятора равна

$$W_{\text{РЕГ}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_p. \quad (56)$$

Принцип действия заключается в том, что регулятор вырабатывает управляющий сигнал, пропорциональный величине ошибки (чем больше ошибка e , тем больше управляющий сигнал U).

2. Построение компьютерной модели САР с П-законом регулирования

В лабораторной работе исследуется замкнутая система автоматического регулирования, структурная схема которой приведена на рис. 65.

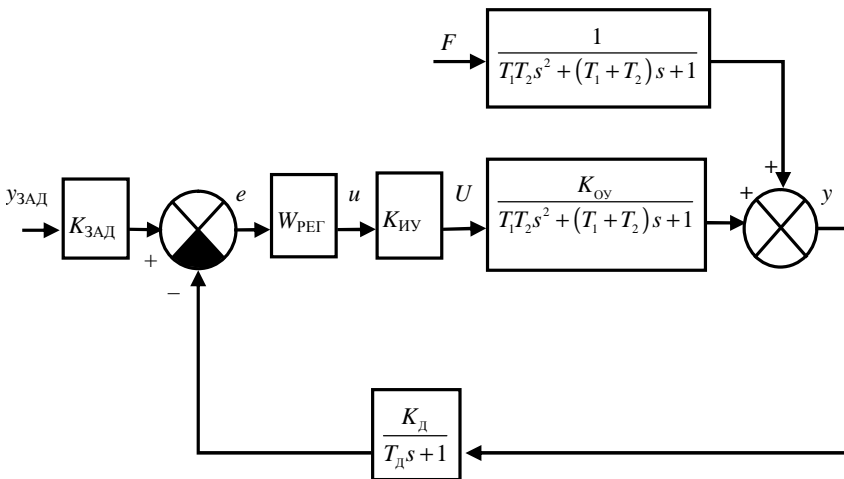


Рис. 65. Структурная схема моделируемой САР:

y – управляемая величина; $у_{\text{зад}}$ – заданное значение управляемой величины;

e – ошибка управления; u – сигнал управления;

U – управляющее воздействие на объект со стороны исполнительного устройства; F – возмущающее воздействие на объект

Передаточные функции объекта управления имеют вид передаточной функции апериодического звена 2-го порядка, как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям, что

соответствует, например, математическому описанию сушильного шкафа, изображенного на рис. 37. Данная структурная схема, таким образом, представляет собой структурную схему линейной непрерывной системы автоматического регулирования температуры в сушильном шкафу.

Передаточная функция датчика соответствует передаточной функции апериодического звена 1-го порядка, что характерно для датчиков температуры. Например, значения параметров передаточной функции $K_d = 3,9 \text{ Ом/}^\circ\text{C}$, $T_d \approx 20 \text{ с}$ соответствуют термометру сопротивления Pt1000. Задатчиком в данном случае может выступать переменное сопротивление, включаемое вместе с термосопротивлением датчика в резистивную измерительную мостовую схему (см. рис. 34), на выходе которой вырабатывается сигнал (электрическое напряжение) ошибки $e(t)$.

Исполнительным устройством (механизмом) может служить электронный усилитель мощности, на вход которого поступает сигнал устройства управления (регулятора), а выходным сигналом является электрическая активная мощность, подаваемая на нагревательный элемент. Математическое описание исполнительного устройства соответствует описанию безынерционного звена: $K_{иу}$.

Передаточная функция регулятора $W_{рег}$ выбирается в соответствии с рассматриваемым типовым линейным законом регулирования (в данном случае, П-законом). Получаем $W_{рег} = K_p$.

Для схемы САР, изображенной на рис. 65, выражения для $W_0(s)$, $W_{oc}(s)$, $W_F(s)$ равны:

$$W_0(s) = W_{рег}(s) K_{иу} \frac{K_{ов}}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1};$$

$$W_{oc}(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1};$$

$$W_F(s) = \frac{1}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}.$$

Передаточная функция (52) ошибки регулирования САР по задающему воздействию (т. е. связь ошибки регулирования e с изменением задающего воздействия $u_{зад}$) в этом случае (с учетом формулы (56)) имеет следующий вид:

$$W_{e_y}(s) = \frac{1}{K_p K_{\text{ин}} \frac{K_{\text{ОУ}}}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1} \frac{K_{\text{Д}}}{T_{\text{Д}} s + 1} + 1} =$$

$$= \frac{(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)(T_{\text{Д}} s + 1)}{(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)(T_{\text{Д}} s + 1) + K_p K_{\text{ин}} K_{\text{ОУ}} K_{\text{Д}}}.$$

Передаточная функция (53) ошибки регулирования САР по возмущающему воздействию (связь ошибки регулирования e с изменением возмущающего воздействия F) равна

$$W_{e_F}(s) = \frac{1}{K_p K_{\text{ин}} \frac{K_{\text{ОУ}}}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1} \frac{K_{\text{Д}}}{T_{\text{Д}} s + 1} + 1} =$$

$$= \frac{T_{\text{Д}} s + 1}{(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)(T_{\text{Д}} s + 1) + K_p K_{\text{ин}} K_{\text{ОУ}} K_{\text{Д}}}.$$

Выполните запуск пакета компьютерного моделирования Simulink (так, как это показано в лабораторной работе № 1).

Введите в MATLAB заданные преподавателем значения параметров передаточных функций элементов САР. Для этого в окне ввода команд Command Window в строке ввода введите следующие команды:

```
>> clear all; close all; clc;
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта
>> global K_sens T_sens % параметры датчика
>> global K_mech % параметры исполнительного
% устройства (механизма)
>> global K_p % коэффициент усиления регулятора
>> T1= ;
>> T2 = ;
>> K_obj= 1;
>> K_sens = 3.9;
>> T_sens = 20;
>> K_mech = 1;
>> K_p = 1; % начальное значение
```

После знаков равенства нужно ввести значения параметров T_1 и T_2 в соответствии с вариантом.

Далее на основе структурной схемы САУ (рис. 65) создайте модель заданной САУ в Simulink в окне редактирования модели.

Приблизительный итоговый вид создаваемой графической модели исследуемой САУ температуры в сушильном шкафу показан на рис. 66.

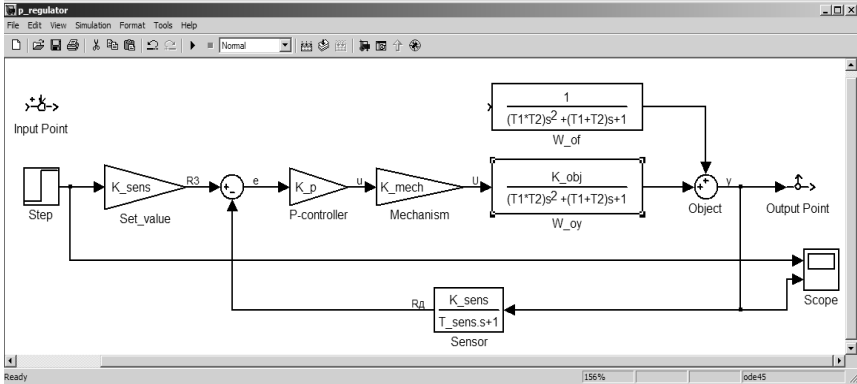


Рис. 66. Графическая модель исследуемой САУ с П-законом регулирования

Для создания новой модели, состоящей из нескольких элементов, в меню окна Simulink Library Browser выполните команду File→New→Model.

1) Объект управления (сушильный шкаф) математически представляет собой суммирующее звено, выполняющее функцию сложения двух сигналов: управляющего и возмущающего воздействий.

В окне Simulink Library Browser в библиотеке Simulink на вкладке Math Operations найдите компонент Sum, выделите его левой клавишей мыши и, не отпуская ее, перетащите данный компонент в окно редактирования модели untitled. Для задания имени компонента щелкните по нему один раз правой кнопкой мыши, во всплывающем меню выберите пункт Format→Show Name; на появившейся снизу надписи Sum щелкните левой клавишей мыши, в строке редактирования надписи замените надпись Sum на Object (Объект управления); выйдите из строки редактирования надписи щелчком левой клавиши мыши

на свободном пространстве окна `untitled`. Для задания требуемого расположения входов (сверху и слева) выполните двукратный щелчок левой клавишей мыши по самому компоненту, в появившемся диалоговом окне `Block parameters` в строке `List of sings` вместо последовательности `||++` введите последовательность `++|`, после чего нажмите `Apply` и `ОК`.

2) Передаточная функция объекта управления по управляющему воздействию $W_{Oy} = \frac{K_{об}}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}$.

В окне `Simulink Library Browser` в библиотеке `Simulink` на вкладке `Continuous` левой клавишей мыши выделите компонент `Transfer Fcn` и перетащите его в окно редактирования модели (расположив его слева от суммирующего компонента `Object`). Задайте имя нового компонента: левой клавишей мыши щелкните на надписи `Transfer Fcn` под его изображением, войдите в строку редактирования надписи и замените ее на `W_ou` (передаточная функция объекта по управляющему воздействию). После этого следует задать саму передаточную функцию, для чего выполните двойной щелчок левой клавишей мыши на изображении компонента, и в окне редактирования его параметров `Block parameters`; в строке `Numerator` (Числитель), определяющей коэффициенты в числителе передаточной функции, вместо имеющейся там единицы введите коэффициент преобразования объекта – `[K_obj]`; в строке `Denominator` (Знаменатель), определяющей коэффициенты полинома в знаменателе передаточной функции, введите `[(T1*T2) (T1+T2) 1]`, после чего нажмите `Apply` и `ОК`.

Соедините компонент `W_ou` с суммирующим элементом `Object`, для чего подведите курсор мыши к компоненту `W_ou` справа (к указателю выхода), затем, нажав левую клавишу мыши, соедините его с левым указателем входа компонента `Object`.

3) Передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию $W_{OF} = \frac{1}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}$.

Выберите компонент `Transfer Fcn` (см. предыдущий пункт), расположите его в окне редактирования модели сверху от компонента

W_{ou} . Задайте имя компонента: W_{of} . Задайте передаточную функцию: в строке **Numerator** оставьте предлагаемое по умолчанию значение коэффициента преобразования – [1]; в строке **Denominator** введите $[(T1*T2) (T1+T2) 1]$, после чего нажмите **Apply** и **ОК**. Соедините компонент W_{of} с суммирующим элементом **Object** (с верхним входом).

4) Исполнительное устройство (механизм). Как видно из структурной схемы на рис. 65, исполнительное устройство является безынерционным звеном – его передаточная функция равна константе: $W_{иу}(s) = K_{иу}$.

Выберите компонент **Gain** (Линейное усиление), находящийся в библиотеке **Simulink** на вкладке **Math Operations**. Перетащите его в окно редактирования модели, расположив слева от W_{ou} . Задайте имя компонента: **Mechanism**. Щелкнув два раза левой кнопкой мыши на самом компоненте, откройте окно редактирования его параметров **Block parameters** и в строке **Gain** введите коэффициент усиления – K_{mech} . Соедините компонент **Mechanism** с входом компонента W_{ou} . На появившейся соединяющей линии-стрелке щелкните правой кнопкой мыши, во всплывающем меню выберите пункт **Signal properties**, и в появившемся диалоговом окне в строке **Signal name** введите обозначение сигнала на выходе исполнительного устройства – **U** (управляющее воздействие на объект), после чего нажмите **Apply** и **ОК**.

Обозначение **U** можно расположить сверху над стрелкой путем перетаскивания левой клавишей мыши.

5) Регулятор (устройство управления). Аналогично предыдущему выберите компонент **Gain** на вкладке **Math Operations** и расположите его в окне редактирования модели слева от исполнительного устройства. Задайте имя компонента: **P-controller**. Введите значение коэффициента усиления – K_p . Соедините компонент **P-controller** с входом исполнительного устройства. Введите обозначение сигнала на выходе регулятора – **u** (сигнал управления).

6) Устройство сравнения, находящее разность сигналов датчика и датчика и, таким образом, вырабатывающее сигнал ошибки e .

В библиотеке Simulink на вкладке Math Operations выберите компонент Sum, расположите его в окне редактирования модели слева от элемента P-controller. Щелкнув два раза на элементе левой кнопкой мыши, откройте диалоговое окно задания его параметров Block parameters.


В строке List of sings вместо последовательности |++ введите последовательность |+-, после чего нажмите Apply и ОК. При этом сигнал, подаваемый на нижний вход данного элемента, будет вычитаться из сигнала, подаваемого на вход слева. Выход сумматора соедините со входом элемента P-controller. Сигнал на выходе сумматора обозначьте e (*error* – сигнал ошибки регулирования).

7) Задатчик. Компонент Gain, расположенный на вкладке Math Operations, перетащите в окно редактирования модели, поместив слева от сравнивающего устройства. Задайте имя компонента: Set_value. Введите значение коэффициента преобразования K_sens. Соедините Set_value с левым входом (плюсом) сравнивающего устройства. Введите обозначение сигнала R_з на выходе задатчика Set_value.

8) Датчик. Для представления датчика используется компонент Transfer Fcn на вкладке Continuous. Расположите его в окне редактирования модели приблизительно под элементом исполнительного устройства.

Зеркально отразите его слева направо: для этого щелкните на самом компоненте правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выполните команду Format→Flip block. Задайте имя компонента: Sensor. Задайте передаточную функцию: в строке Numerator введите коэффициент [K_sens]; в строке Denominator введите [T_sens 1], подтвердите ввод данных нажатием кнопок Apply и ОК. Соедините выход датчика с нижним входом (минусом) сумматора, при этом линию связи обозначьте как R_д. Ко входу датчика проведите линию связи от выхода объекта управления Object.

Сохраните построенную графическую модель САР в виде файла с названием p_regulator.mdl, выполнив в окне редактирования модели команду меню File→Save As (можно также с помощью

мышью нажать соответствующую кнопку  на панели инструментов).

3. Исследование показателей качества регулирования САР с П-законом регулирования


Для проведения исследования зависимости показателей качества регулирования САР от значения коэффициента усиления П-регулятора следует получить переходные функции САР при различных значениях K_p путем компьютерного моделирования.

Переходная функция САР – это график изменения управляемой величины системы при ступенчатом изменении задающего либо возмущающего воздействий. Соответственно, рассматривают обычно две переходные функции САР: *переходную функцию системы по задающему воздействию* и *переходную функцию системы по возмущающему воздействию*.

Для моделирования подачи на вход системы (на задатчик **Set_value**) ступенчатого задающего воздействия используется находящийся в библиотеке Simulink на вкладке Sources компонент **Step**.

Разместите компонент **Step** в окне редактирования модели слева от задатчика **Set_value**. Соедините выход компонента **Step** со входом задатчика. **Set_value** (см. рис. 66).


Для отображения в виде графика изменений сигналов задающего воздействия и управляемой величины используется находящийся на вкладке Sinks компонент **Scope**.

Расположите компонент **Scope** в окне редактирования модели. Первоначально компонент **Scope** имеет один вход, т. е. предназначен для отображения графика только одного сигнала. Для отображения двух сигналов необходимо задать число его входов равным 2. Для этого левой кнопкой мыши выполните двойной щелчок на компоненте **Scope**, в результате откроется окно **Scope**, содержащее поле для отображения графика. В верхней части этого окна на панели инструментов выполните левой кнопкой мыши щелчок на кнопке **Parameters**  (второй слева), в появившемся всплывающем окне задания

параметров в поле **Number of axes** введите число 2, ввод данных подтвердите нажатием **Apply** и **OK**. После этого в окне редактирования модели (компонент **Scope** уже имеет 2 входа) верхний вход **Scope** соедините с выходом элемента **Step** (задающее воздействие), а нижний вход – с выходом сумматора **Object** (Объект управления).

Задайте параметры моделирования. Для этого в меню окна редактирования модели выполните команду **Simulation**→**Simulation parameters**. В появившемся диалоговом окне задания параметров на вкладке **Solver** значение **Start time** оставьте равным 0.0, значение **Stop time** замените на 2000.0; на вкладке **Workspace I/O** уберите галочку в поле **Limit data points to last**; ввод данных подтвердите нажатием **Apply** и **OK**.

Запустите процесс моделирования, выполнив в меню окна редактирования модели команду **Simulation**→**Start**.

По окончании процесса моделирования в строке состояния окна редактирования модели появится слово **Ready** (обозначающее готовность к новым вычислениям), а в окне **Scope** – отобразятся графики изменения задающего воздействия (на верхнем поле) и управляемой величины (на нижнем поле). Для более детального рассмотрения графиков можно увеличить окно **Scope** до размеров всего экрана, а также нажать левой кнопкой мыши на панели инструментов кнопку **Autoscale**  (Автоматическое масштабирование).

Для *анализа динамических характеристик линейных САУ* в **Simulink** имеется специальный компонент – **LTI Viewer**. С его помощью можно быстро и легко рассчитывать временные (переходная функция, импульсная переходная функция, перерегулирование, время регулирования, статическую ошибку регулирования) и частотные (АЧХ, ФЧХ, годограф Найквиста) характеристики моделируемой САУ.

Получите с помощью компонента **LTI Viewer** переходную функцию исследуемой САУ по задающему воздействию: сначала в окне редактирования модели отключите компонент **Step** от входа системы (удалите линию, соединяющую выход **Step** и вход задатчика **Set_value**). Далее в этом же окне выполните

команду меню **Tools**→**Linear analysis**. В результате этого на экране появятся два новых окна: **LTI Viewer** – окно, в котором будет отображаться график переходной функции, и **Model Inputs and Outputs** – окно, содержащее входную (**Input point**) и выходную (**Output point**) метки для указания входной и выходной точек системы. Обе эти метки с помощью мыши перетащите на свободное пространство в окно редактирования модели (см. рис. 66). После этого выход **Input point** соедините с входом задатчика, а вход **Output point** – с выходом объекта управления **Object**. Сохраните изменения (в том же файле). Далее перейдите в окно **LTI Viewer**, на самом окне щелкните правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выберите пункт **Plot types**→**Step**. Для получения графика переходной функции САУ выполните в этом же окне команду меню **Simulink**→**Get Linearizes Model**.

В результате в окне **LTI Viewer** появится график переходной функции.

По полученному графику найдите показатели качества регулирования САУ.

Для определения **перерегулирования** σ на свободном пространстве окна **LTI Viewer** с полученным графиком следует нажать правую клавишу мыши и во всплывающем меню выбрать пункт **Characteristics**→**Peak Response** (максимальная амплитуда). В результате на графике будет отмечена точка, соответствующая максимуму переходной функции. При наведении указателя мыши на данную точку появится всплывающая подсказка со следующей информацией: значение максимума (**Peak amplitude**), *перерегулирование*, выраженное в процентах (**Overshoot(%)**), значение соответствующего момента времени от начала моделирования (**At time (sec)**);

Для определения **времени регулирования** $t_{\text{РЕГ}}$ после щелчка правой клавишей мыши на свободной области графика во всплывающем меню нужно выбрать пункт **Characteristics**→ **Settling Time** (Время регулирования);

Для определения **установившегося значения** выходной величины: после щелчка правой клавишей мыши на свободной области графика во всплывающем меню следует выбрать пункт

Characteristics→Steady State (Установившееся значение). Затем необходимо определить значение статической ошибки $e_{СТ}$ по формуле (46).

На рис. 67 показан приблизительный вид полученного графика переходной функции в окне LTI Viewer с нанесенными точками для определения показателей качества регулирования. Для рассматриваемого примера получаем следующие значения: величина перерегулирования $\sigma = 25.8 \%$, время регулирования $t_{РЕГ} = 560$ с, статическая ошибка $e_{СТ} = 1 - 0.796 = 0.204$.

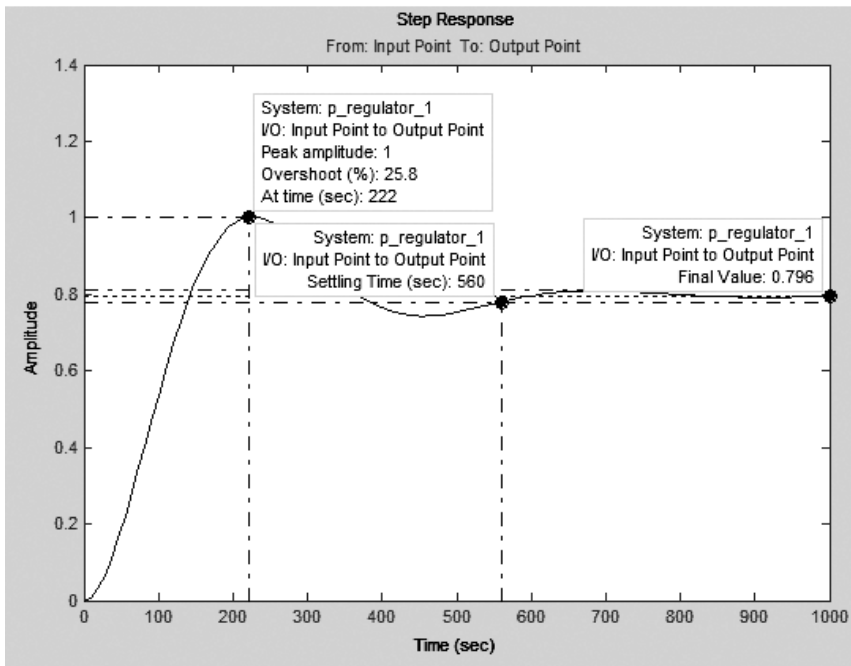


Рис. 67. График переходной функции в окне LTI Viewer

Для каждого значения коэффициента усиления П-регулятора K_p : 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, ... (исследования проводятся до тех пор, пока система не потеряет устойчивость) получите в окне LTI Viewer переходную функцию САР и определите соответствующие значения σ , $t_{РЕГ}$ и $e_{СТ}$. Результаты отразите в табл. 7.

Исследование показателей качества регулирования САР
с П-законом регулирования

Величина	Значение			
K_p	0.5	1	1.5	...
$\sigma, \%$...
$t_{\text{РЕГ}}, \text{с}$				
$e_{\text{ст.}}$				

4. Исследование свойств САР с П-законом регулирования

По данным табл. 7 постройте графики $\sigma = \sigma(K_p)$, $t_{\text{РЕГ}} = t_{\text{РЕГ}}(K_p)$, $e_{\text{ст}} = e_{\text{ст}}(K_p)$ и определите зависимости показателей качества регулирования САР – перерегулирования σ , времени регулирования $t_{\text{РЕГ}}$ и статической ошибки регулирования $e_{\text{ст}}$ – от значения коэффициента усиления П-регулятора.

Сделайте выводы о том, как изменяются значения показателей качества регулирования при изменении коэффициента усиления П-регулятора K_p .

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Компьютерная модель исследуемой САР, созданная в Simulink.
3. Результаты компьютерного моделирования (табл. 7).
4. Графики зависимостей перерегулирования σ , времени регулирования $t_{\text{РЕГ}}$ и статической ошибки регулирования $e_{\text{ст}}$ от значения коэффициента усиления П-регулятора: $\sigma = \sigma(K_p)$, $t_{\text{РЕГ}} = t_{\text{РЕГ}}(K_p)$, $e_{\text{ст}} = e_{\text{ст}}(K_p)$.
5. Выводы о свойствах САР с П-законом регулирования.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение закона регулирования САР.
2. Дайте определение пропорционального закона регулирования.
3. Что можно сказать о наличии статической ошибки регулирования при использовании П-регулятора?

4. Как изменяется значение статической ошибки регулирования САР при изменении значения коэффициента усиления П-регулятора K_p ?

5. Как изменяется значение перерегулирования σ при изменении значения коэффициента усиления П-регулятора K_p ?

6. Как изменяется время регулирования САР $t_{\text{РЕГ}}$ при изменении значения коэффициента усиления П-регулятора K_p ?

Исходные данные по вариантам

Вариант	T1, с	T2, с
1	80	250
2	100	250
3	100	200
4	100	300
5	150	250

Лабораторная работа № 8
**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ
ЗАКОНОМ (И-ЗАКОНОМ) РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Цель работы: исследовать свойства САР с И-законом регулирования.

Задание:

1. Построить компьютерную модель замкнутой САР с И-законом регулирования, используя пакет компьютерного моделирования Simulink.
2. Исследовать зависимость показателей качества регулирования САР и интегрального критерия качества от значения коэффициента интегрирования И-регулятора.
3. Сделать выводы о свойствах САР с И-законом регулирования.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Работа выполняется на персональных ЭВМ с использованием среды компьютерного моделирования MATLAB Simulink.

Выполнение работы

1. Интегральный закон (И-закон) регулирования

При интегральном законе регулирования сигнал ошибки $e(t)$ и управляющее воздействие на объект $U(t)$ связаны следующим соотношением:

$$U(t) = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (57)$$

где K_I – некоторый постоянный коэффициент интегрирования.

Соответственно, *передаточная функция регулятора* равна:

$$W_{\text{РЕГ}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_I \frac{1}{s}. \quad (58)$$

Для реализации И-закона регулирования в схему САР в состав устройства управления либо исполнительного устройства должен быть введен интегрирующий элемент. Таким элементом может

быть, например, интегрирующий усилитель, электрическая схема которого приведена на рис. 68, а. Сигнал на выходе такого усилителя пропорционален интегралу от входного сигнала:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{ВХ}}(\tau) d\tau. \quad (59)$$

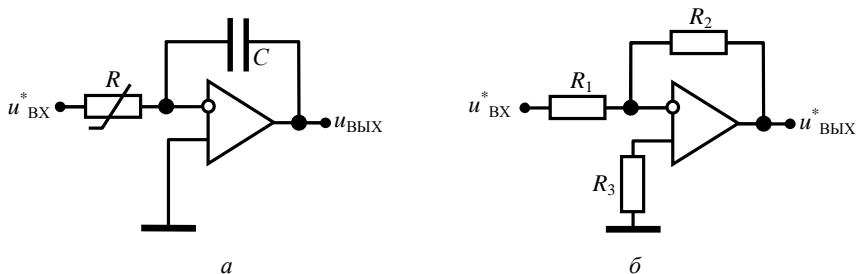


Рис. 68. Электрические схемы интегрирующего (а) и инвертирующего (б) усилителя

Для компенсации знака « \leftarrow » в формуле (59), т. е. для того, чтобы входное и выходное напряжения усилителя совпадали по знаку, к выходу интегрирующего усилителя можно последовательно подключить инвертирующий усилитель, который изменяет знак входного сигнала на противоположный:

$$u_{\text{ВЫХ}}^*(t) = -\frac{R_2}{R_1} u_{\text{ВХ}}^*(t). \quad (60)$$

Получаем

$$u_{\text{ВЫХ}}^*(t) = K_I \int_0^t u_{\text{ВХ}}(\tau) d\tau, \quad (61)$$

где $K_I = \frac{R_2}{R_1 RC}$, с^{-1} .

Переходный процесс в САР с И-регулятором характеризуется отсутствием статической ошибки регулирования, наибольшим значением отклонения регулируемой величины от установившегося

значения по сравнению с другими законами регулирования, наибольшим временем регулирования.

Главным достоинством интегрального регулятора является отсутствие статической ошибки регулирования.

2. Построение компьютерной модели замкнутой САР с И-законом регулирования

В лабораторной работе исследуется замкнутая система автоматического регулирования, структурная схема которой приведена на рис. 65 (см. лабораторную работу № 7). При этом передаточная функция регулятора $W_{\text{РЕГ}}$ выбирается в соответствии с рассматриваемым типовым линейным законом регулирования (в данном случае, И-законом). Получаем $W_{\text{РЕГ}} = K_I \cdot 1/s$.

Для рассматриваемой САР передаточная функция ошибки регулирования по задающему воздействию формула (52) при И-закоме регулирования (с учетом формулы (58)) имеет вид

$$W_{e_y}(s) = \frac{1}{\frac{K_I}{s} K_{\text{ИУ}} \frac{K_{\text{ОУ}}}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1} \cdot \frac{K_{\text{Д}}}{T_{\text{Д}} s + 1} + 1} =$$

$$= \frac{s(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)(T_{\text{Д}} s + 1)}{s(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)(T_{\text{Д}} s + 1) + K_I K_{\text{ИУ}} K_{\text{ОУ}} K_{\text{Д}}}.$$

Передаточная функция (53) ошибки регулирования САР по возмущающему воздействию (с учетом формулы (58)) равна

$$W_{e_F}(s) = \frac{1}{\frac{K_I}{s} K_{\text{ИУ}} \frac{K_{\text{ОУ}}}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1} \cdot \frac{K_{\text{Д}}}{T_{\text{Д}} s + 1} + 1} =$$

$$= \frac{s(T_{\text{Д}} s + 1)}{s(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)(T_{\text{Д}} s + 1) + K_I K_{\text{ИУ}} K_{\text{ОУ}} K_{\text{Д}}}.$$

Тогда в статическом режиме после окончания процесса регулирования (т. е. при $t \rightarrow \infty$ и, соответственно, $s \rightarrow 0$) выражения для $W_{e_y}(s)$ и $W_{e_F}(s)$ становятся равными нулю:

$$W_{eY}(s)_{s \rightarrow 0} = 0;$$

$$W_{eF}(s)_{s \rightarrow 0} = 0.$$

Следовательно, ошибка регулирования в статическом режиме также будет равна нулю.

Выполните запуск пакета компьютерного моделирования Simulink так, как это указано при описании выполнения лабораторной работы № 1. В окне ввода команд Command Window в строке ввода введите следующие команды:

```
>> clear all; close all; clc;  
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта  
>> global K_sens T_sens % параметры датчика  
>> global K_mech % параметры исполнительного  
% устройства (механизма)  
>> global K_I % коэффициент интегрирования регулятора  
>> T1= ;  
>> T2 = ;  
>> K_obj= 1;  
>> K_sens = 3.9;  
>> T_sens = 20;  
>> K_mech = 1;  
>> K_I = 0.001; % начальное значение
```

После знаков равенства введите заданные значения параметров T1 и T2 (по вариантам).

Далее на основе структурной схемы САР на рис. 65 создайте в Simulink модель САР с И-законом регулирования. В качестве начальной основы можно взять изображенную на рис. 66 модель САР, созданную при выполнении предыдущей лабораторной работы № 7.

Откройте файл модели, созданный при выполнении лабораторной работы № 7, выполнив в меню окна Simulink Library Browser команду File→Open.

В данную модель внесите следующие изменения.

- 1) Удалите связь между выходом устройства сравнения и входом компонента P-controller.
- 2) Двойным щелчком левой кнопкой мыши на компоненте P-controller откройте окно задания его параметров.

В строке Gain вместо K_p введите коэффициент интегрирования K_i . Результат ввода подтвердите нажатием клавиш Apply и OK.

3) Название компонента P-controller измените на Koefficient.

4) Добавьте в модель компонент Integrator, находящийся в библиотеке Simulink на вкладке Continuous. Значок интегратора поместите между значками устройства сравнения и коэффициента интегрирования. Выход устройства сравнения соедините со входом интегратора, а выход интегратора – со входом значка коэффициента интегрирования.

Приблизительный вид создаваемой модели показан на рис. 69.

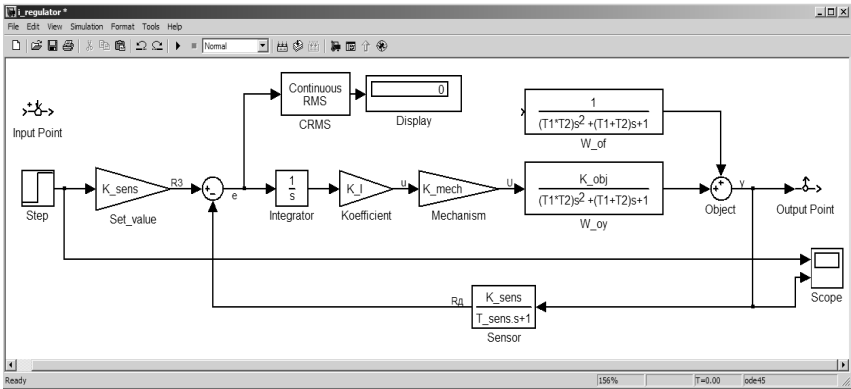


Рис. 69. Графическая модель исследуемой САП с И-законом регулирования

5) Для определения интегрального критерия качества J используется компонент Continuous RMS (CRMS). Данный компонент вычисляет среднее квадратическое значение непрерывного сигнала $f(t)$, поступающего на его вход:

$$RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t f^2(\tau) d\tau},$$

где T – интервал времени, в течение которого выполняются регистрация сигнала $f(t)$, т. е., в нашем случае, интервал времени моделирования работы САП.

Добавьте в модель компонент Continuous RMS (CRMS), находящийся в библиотеке NCD Blockset на вкладке RMS Blocks.

Вход компонента **Continuous RMS** подключите к выходу устройства сравнения.

Таким образом, на вход компонента **Continuous RMS** будет подаваться сигнал ошибки регулирования $e(t)$. В итоге значение интегрального критерия качества регулирования автоматически рассчитывается по формуле:

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2(\tau) d\tau}. \quad (62)$$

Если время моделирования будет выбрано достаточно большим для того, чтобы переходный процесс закончился, то определяемый по формуле (62) интегральный показатель качества регулирования J по своему физическому смыслу будет соответствовать показателю J , определяемому по формуле (49).

Задайте интервал времени моделирования T : в окне редактирования модели выберите пункт меню **Simulation**→**Simulation parameters...** и в появившемся окне задания параметров моделирования в ячейке **Stop time** укажите 12000 (момент времени начала моделирования в ячейке **Start time** оставьте равным нулю).

Для отображения рассчитанного числового значения показателя J используется компонент **Display**, находящийся в библиотеке **Simulink** на вкладке **Sinks**. Переместите данный компонент в окно редактирования модели, вход компонента **Display** соедините с выходом компонента **Continuous RMS**.

Теперь при моделировании работы САП в поле компонента **Display** будет отображаться числовое значение интегрального показателя J .

6) Сохраните измененную модель в новом файле с названием **i_regulator.mdl**.

7) В окне редактирования модели отключите компонент **Step** от входа системы (удалите линию, соединяющую выход **Step** и вход задатчика **Set_value**).

Как было показано при выполнении пункта 3 лабораторной работы № 7, в этом же окне выполните команду меню **Tools**→**Linear analysis**. Из окна **Model Inputs and Outputs** обе метки (**Input point** и **Output point**) с помощью мыши перетащите на свободное

пространство в окне редактирования модели и соедините выход **Input point** с входом задатчика **Set_value**.

Вход **Output point** соедините с выходом объекта управления **Object**. В окне **LTI Viewer** выполните команду меню **Simulink**→**Get Linearizes Model** и нанесите на график полученной переходной функции точки для определения *перерегулирования* и *времени регулирования* (см. пункт 3 лабораторной работы № 7).

Отключите элемент **Input point** от входа системы.

Сохраните изменения (в том же файле).

3. Исследование показателей качества регулирования для САР с И-законом регулирования

Для каждого значения коэффициента усиления И-регулятора K_I : 0.0001, 0.0002, ..., 0.0009, 0.001, 0.002, 0.003, ... (исследования проводятся до тех пор, пока система не потеряет устойчивость) выполните следующие действия:

- в окне редактирования модели подключите элемент **Input point** ко входу системы. Получите переходную функцию САР с помощью компонента **LTI Viewer** (в окне **LTI Viewer** выполните команду меню **Simulink**→**Get Linearizes Model**). Определите соответствующие значения σ и $t_{\text{рег}}$ и внесите их в табл. 8. Отключите элемент **Input point** от входа системы;

- в окне редактирования модели подключите элемент **Step** ко входу системы. Выполните моделирование (в окне редактирования модели выполните команду меню **Simulation**→**Start**). В поле компонента **Display** будет отображено числовое значение интегрального показателя J , внесите его в табл. 8. Отключите элемент **Step** от входа системы.

Таблица 8

Показатели качества регулирования САР с И-законом регулирования

Величина	Значение							
	0.0001	0.0002	0.0003	...	0.0009	0.001	0.002	...
K_I								
J								
$\sigma, \%$								
$t_{\text{рег}}, \text{с}$								

4. Исследование свойств САР с И-законом регулирования

По данным табл. 8 постройте графики $J = J(K_I)$, $\sigma = \sigma(K_I)$, $t_{\text{РЕГ}} = t_{\text{РЕГ}}(K_I)$ и определите зависимости интегрального критерия качества регулирования J , перерегулирования σ и времени регулирования $t_{\text{РЕГ}}$ – от значения коэффициента интегрирования И-регулятора K_I .

Сделайте выводы о том, как изменяются значения показателей качества регулирования при изменении коэффициента интегрирования K_I .

Сравните полученные минимальные значения перерегулирования σ и времени регулирования $t_{\text{РЕГ}}$ для САР с И-законом регулирования с соответствующими минимальными значениями σ и $t_{\text{РЕГ}}$ для САР с П-законом регулирования, исследованной в предыдущей лабораторной работе.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Компьютерная модель исследуемой САР, созданная в Simulink.
3. Результаты компьютерного моделирования (табл. 8).
4. Графики зависимостей перерегулирования σ , времени регулирования $t_{\text{РЕГ}}$ и интегрального критерия качества J от значения коэффициента интегрирования И-регулятора: $\sigma = \sigma(K_I)$, $t_{\text{РЕГ}} = t_{\text{РЕГ}}(K_I)$, $J = J(K_I)$.
5. Сравнение полученных минимальных значений перерегулирования σ и времени регулирования $t_{\text{РЕГ}}$ для САР с И-законом регулирования с соответствующими минимальными значениями σ и $t_{\text{РЕГ}}$ для САР с П-законом регулирования.
6. Выводы о свойствах САР с И-законом регулирования.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение интегрального закона регулирования САР.
2. Приведите формулу интегрального квадратичного критерия качества регулирования J .
3. Чему равна статическая ошибка регулирования при использовании И-регулятора?

4. Как изменяется значение интегрального критерия качества J при изменении значения коэффициента усиления И-регулятора K_I ?
5. Как изменяется значение перерегулирования σ при изменении значения коэффициента усиления И-регулятора K_I ?
6. Как изменяется время регулирования $t_{\text{РЕГ}}$ САР при изменении значения коэффициента усиления И-регулятора K_I ?
7. Как изменяются значения перерегулирования σ и времени регулирования $t_{\text{РЕГ}}$ при использовании И-регулятора по сравнению с соответствующими показателями для П-регулятора?

Исходные данные по вариантам

Вариант	T1, с	T2, с
1	80	250
2	100	250
3	100	200
4	100	300
5	150	250

Лабораторная работа № 9
**СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Цель работы: ознакомиться с методами синтеза САР.

Задание:

1. Построить компьютерную модель замкнутой САР с ПИД-регулятором в качестве устройства управления, используя пакет компьютерного моделирования Simulink.

2. Выполнить настройку ПИД-регулятора методом Зиглера–Никольса.

3. Выполнить настройку ПИД-регулятора с помощью реализованного в Simulink интерфейса компьютерной оптимизации и настройки САР NCD Outport.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Работа выполняется на персональных ЭВМ с использованием среды компьютерного моделирования MATLAB Simulink.

Выполнение работы

**1. Построение компьютерной модели САР
с ПИД-законом регулирования**

***Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон
(ПИД-закон)***

Для обеспечения устойчивости и качества регулирования САР (нулевая статическая ошибка, высокое быстродействие) используют пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования (ПИД-закон).

При формировании управляющего сигнала в соответствии с ПИД-законом учитываются:

§ значение сигнала ошибки;

§ интеграл от сигнала ошибки;

§ скорость изменения (производная) сигнала ошибки:

$$U(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}. \quad (63)$$

Пропорциональная составляющая вырабатывает выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения, наблюдаемому в данный момент времени. Он тем больше, чем больше это отклонение. Если входной сигнал равен заданному значению, то выходной равен нулю. Однако при использовании только пропорционального регулятора регулируемая величина никогда не стабилизируется на заданном значении: существует статическая ошибка.

Интегральная составляющая пропорциональна интегралу от сигнала рассогласования. Ее используют для устранения статической ошибки. Она позволяет регулятору со временем учесть статическую ошибку. Если система не испытывает внешних возмущений, то через некоторое время регулируемая величина стабилизируется на заданном значении, сигнал пропорциональной составляющей будет равен нулю, а выходной сигнал будет полностью обеспечивать интегральная составляющая.

Дифференциальная составляющая пропорциональна темпу изменения сигнала рассогласования и предназначена для противодействия отклонениям от целевого значения, которые прогнозируются в будущем. Отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему.

Устройство управления, функционирующее на основе ПИД-закона, называется **ПИД-регулятором**. ПИД-регулятор был изобретен в 1910 г. После появления микропроцессоров в 1980-х гг. развитие ПИД-регуляторов происходит нарастающими темпами. ПИД-регулятор относится к наиболее распространенному типу регуляторов. Около 90–95 % регуляторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют ПИД-закон регулирования.

Построение компьютерной модели САР с ПИД-законом регулирования. В лабораторной работе исследуется замкнутая система автоматического регулирования, структурная схема которой приведена на рис. 65 (см. лабораторную работу № 7). При этом передаточная функция регулятора $W_{\text{РЕГ}}$ выбирается в соответствии с рассматриваемым типовым линейным законом регулирования (в данном случае, ПИД-законом).

Выполните запуск пакета компьютерного моделирования Simulink так, как это указано при описании выполнения лабораторной работы № 1.

В окне ввода команд **Command Window** в строке ввода введите следующие команды:

```
>> clear all; close all; clc;
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта
>> global K_sens T_sens % параметры датчика
>> global K_mech % параметры исполнительного
% устройства (механизма)
>> global K_p K_I K_d % коэффициенты ПИД-регулятора
>> T1= ;
>> T2 = ;
>> K_obj= 1;
>> K_sens = 3.9;
>> T_sens = 20;
>> K_mech = 1;
>> K_p = 0;
>> K_I = 0;
>> K_d = 0;
```

После знаков равенства нужно ввести значения параметров **T1** и **T2** в соответствии с вариантом.

Далее на основе структурной схемы САР на рис. 65 нужно создать в **Simulink** модель САР с ПИД-регулятором в качестве устройства управления. За начальную основу можно взять изображенную на рис. 66 модель САР, созданную при выполнении лабораторной работы № 7. В данной модели необходимо П-регулятор заменить на ПИД-регулятор.

Откройте файл модели, созданный при выполнении лабораторной работы № 7, выполнив в меню окна **Simulink Library Browser** команду **File→Open**.

В данную модель внесите следующие изменения:

1. Удалите компоненты **P_controller**, **Input point**, **Output point**. Удалите линию, соединяющую компонент **Step** и вход осциллографа **Scope**. Двойным щелчком на значке осциллографа **Scope** откройте окно этого элемента, и в меню **Parameters** (кнопка



) на вкладке **General** укажите **Number of axes 1**. Соедините вход осциллографа с выходом объекта управления **Object**.

2. В библиотеке блоков **Simulink Extras** на вкладке **Additional Linear** выберите компонент **PID Controller** (ПИД-регулятор)

и перетащите его в окно редактирования модели, расположите на месте удаленного значка между устройством сравнения и исполнительным устройством. Выход устройства сравнения соедините со входом ПИД-регулятора, а выход ПИД-регулятора – со входом исполнительного устройства.

3. Сохраните созданную модель в новый файл с именем `pid_regulator.mdl`.

Примерный вид созданной графической модели показан на рис. 70.

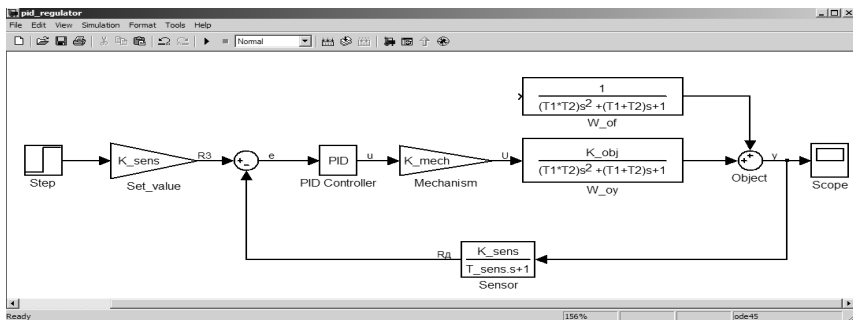


Рис. 70. Графическая модель САУ с ПИД-регулятором

2. Настройка ПИД-регулятора методом Зиглера-Никольса Синтез САУ на основе ПИД-регулятора

В теории автоматического управления можно выделить две характерные задачи:

1) в заданной САУ найти и оценить переходные процессы – это задача *анализа САУ*;

2) по заданным переходным процессам и основным показателям разработать САУ – это задача *синтеза САУ*.

Задача синтеза САУ является гораздо более сложной по сравнению с задачей анализа, так как для задачи синтеза возможно множество вариантов решений. Поэтому обычно задача синтеза САУ ставится ограниченно. Считается, что основная часть системы уже задана и требуется синтезировать устройство управления, то есть выбрать закон регулирования и настроить его параметры. При этом необходимо, чтобы обеспечивался требуемый запас устойчивости, точность управления в установившихся режимах и качество управления в динамических режимах.

Задача синтеза САР на основе ПИД-регулятора состоит в определении значений коэффициентов K_p , K_I и K_d , при которых обеспечивается требуемое качество регулирования САР. С появлением ЭВМ и развитием методов и систем компьютерного моделирования решение данной задачи значительно облегчилось.

В 1942 г. был разработан метод настройки ПИД-регулятора – метод Зиглера-Никольса, названный по именам разработавших его ученых. Данный метод широко используется и в настоящее время.

Суть *метода Зиглера–Никольса* состоит в следующем:

1) Всем трем коэффициентам присваивается нулевое значение: $K_p = 0$, $K_I = 0$, $K_d = 0$.

2) Значение коэффициента K_p постепенно увеличивается с некоторым шагом (при этом необходимо следить за тем, как изменяется реакция системы, т. е. вид переходной функции) до тех пор, пока в системе не начнут наблюдаться незатухающие колебания, т. е. пока система не потеряет устойчивость.

3) Запоминается текущее значение K_p (обозначим его K_u) и измеряется период колебаний системы T_u .

4) Полученные значения K_u и T_u используются для расчета всех параметров ПИД-регулятора по следующим формулам (для непрерывного ПИД-регулятора):

$$\begin{aligned} K_p &= 0,6K_u; \\ K_I &= 2 \frac{K_u}{T_u}; \\ K_d &= \frac{K_u T_u}{8}. \end{aligned} \tag{64}$$

5) Для дискретных ПИД-регуляторов необходимо еще учесть период дискретизации Δt :

$$\begin{aligned} K_p &= 0,6K_u; \\ K_I &= 2 \frac{K_u}{T_u} \Delta t; \\ K_d &= \frac{K_u T_u}{8 \Delta t}. \end{aligned} \tag{65}$$

Основным достоинством метода Зиглера–Никольса является простота выполнения настройки, особенно, учитывая возможность компьютерного моделирования работы САР. Данный метод годится для «грубой» настройки и быстрого введения оборудования в эксплуатацию.

Настройте ПИД-регулятор методом Зиглера-Никольса.

Начальные значения коэффициентов ПИД-регулятора должны быть равны нулю.

В окне редактирования модели выполните двойной щелчок левой клавишей мыши на значке **PID Controller**.

В результате откроется окно задания параметров ПИД-регулятора. В нем по умолчанию коэффициентам присвоены следующие значения: $K_p = 1$ (поле **Proportional**), $K_I = 1$ (поле **Integral**), $K_d = 0$ (поле **Derivative**).

В полях **Proportional** и **Integral** введите нулевые значения, после чего подтвердите ввод нажатием **Apply** и **OK**.

Запустите процесс моделирования работы САР, выбрав для этого команду меню **Simulation** → **Start**.

В результате на экране осциллографа (экран осциллографа открывается двойным щелчком левой клавишей мыши на значке **Scope**) можно убедиться, что изменение выходной величины равно нулю. Это естественно и объясняется тем, что выходной сигнал ПИД-регулятора, в соответствии с формулой (63), имеет нулевое значение.

Постепенно увеличивайте значение параметра **Proportional** в ПИД-регуляторе, для каждого нового значения выполняйте моделирование САР и наблюдайте на экране осциллографа за тем, какой вид имеет график переходной функции САР. Шаг увеличения задает преподаватель.

Когда система окажется на границе устойчивости и переходная функция САР будет иметь вид незатухающих колебаний (рис. 71), соответствующее значение параметра **Proportional** нужно запомнить.

В окне ввода формул **Command Window** в строке ввода команд введите следующие команды:

```
>> K_u =  
>> T_u =
```

После знаков равенства нужно ввести значения параметра Proportional (для переменной K_u) и определенного по графику периода незатухающих колебаний переходной функции (для переменной T_u).

В соответствии с формулой (64) в окне ввода формул Command Window в строке ввода команд введите следующие команды:

```
>> K_p = 0.6*K_u ;  
>> K_I = 2*K_u / T_u ;  
>> K_d = K_u * T_u / 8 ;
```

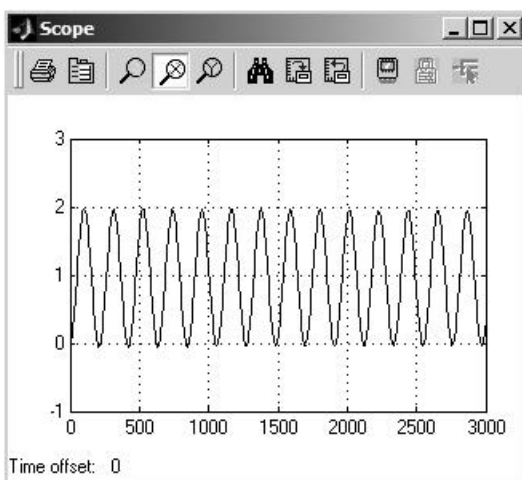


Рис. 71. Переходная функция САР в виде незатухающих колебаний

Переменные K_p , K_I , K_d введите в ПИД-регулятор в поля Proportional, Integral и Derivative соответственно.

Запустите моделирование работы САР, для получившейся переходной функции по задающему воздействию определите значения показателей качества: перерегулирования σ и времени регулирования $t_{\text{рег}}$. Полученный график и значения показателей качества включите в отчет.

Получите переходную функцию по возмущающему воздействию.

Для этого отсоедините выход компонента Step от входа компонента Set_value и соедините со входом компонента W_of.

Таким образом подаваемый на систему входной сигнал будет являться возмущающим воздействием.

Запустите моделирование работы САР, для получившейся переходной функции по возмущающему воздействию определите значения показателей качества: перерегулирования σ и времени регулирования $t_{рег}$. Полученный график и значения показателей качества включите в отчет.

Отсоедините выход компонента **Step** от входа компонента **W_of** и снова соедините со входом компонента **Set_value**.

Запишите в отчет значения K_u , T_u , значения коэффициентов K_p , K_I , K_d , рассчитанные по формуле (64), и полученную передаточную функцию ПИД-регулятора.

3. Настройка ПИД-регулятора с помощью компонента NCD Output

Инструментальный пакет Nonlinear Control Design Blockset (NCD Blockset) предоставляет в распоряжение пользователя графический интерфейс для настройки параметров Simulink-моделей динамических объектов, обеспечивающих желаемое качество переходных процессов.

В окно редактирования модели перетащите компонент **NCD Output**, который находится в библиотеке **NCD Blockset**. Вход компонента **NCD Blockset** соедините с выходом объекта управления **Object**. Двойным щелчком на пиктограмме **NCD Output** откройте рабочее окно данного блока.

Рабочее окно блока **NCD Output** с временными ограничениями по умолчанию показано на рис. 72.

На нем изображено, что контролируемым сигналом является переходная характеристика, на которую накладываются следующие ограничения:

- максимальное перерегулирование – не более 20 %;
- время нарастания – не более 400 с;
- время регулирования – не более 1000 с;
- коридор для определения времени регулирования составляет 1 %;
- длительность переходного процесса (время моделирования) – не более 3000 с.

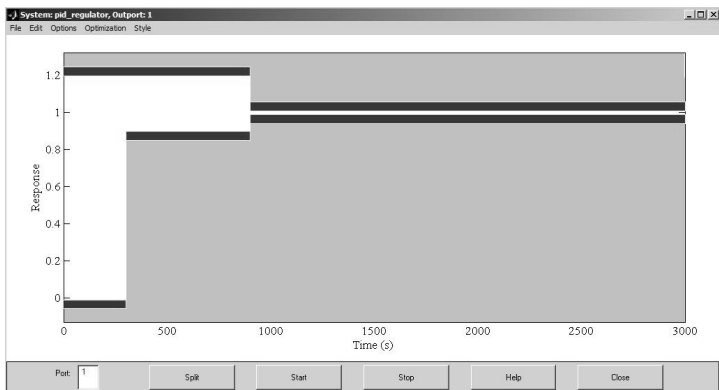


Рис. 72. Рабочее окно блока NCD Output

Для установки других значений временных ограничений наиболее просто с помощью мыши переместить вертикальные и горизонтальные линии ограничений в требуемое положение. Точную установку линий ограничения можно провести, выбрав требуемые линии с помощью щелчка левой клавиши мыши (выбранная линия становится белой) и выполнив в меню **Edit** команду **Edit constraint** (Изменить ограничение), либо щелкнув на соответствующей линии правой клавишей мыши. В появляющемся окне (рис. 73) редактора ограничений **Constraint Editor**, в текстовом поле **Position editor** необходимо задать координаты начальной и конечной точек прямой в формате $[x1, y1, x2, y2]$, нажав затем кнопку **Done**.

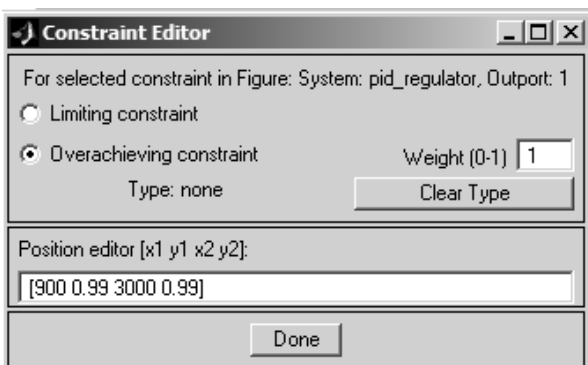


Рис. 73. Окно редактора ограничений

В примере на рис. 73 линия ограничения начинается с точки с координатами (900, 0.99) и продолжается до точки с координатами (3000, 0.99). Эта линия ограничивает снизу 1%-й коридор для определения времени регулирования (так как установившееся значение будет равно 1).

Установите положение левой верхней границы переходного процесса по вертикали с 1.2 на 1.3 (соответствует перерегулированию $\sigma = 30\%$).

Установите время нарастания равным 1000 с (для этого расположите среднюю нижнюю линию на один уровень с левой нижней линией).

Установите коридор для определения времени регулирования равным 5%. Для этого расположите правую верхнюю линию на уровне 1.05, а правую нижнюю линию на уровне 0.95.

Так, например, для установления нижней границы 5%-го коридора (с учетом времени нарастания, равного 1000 с) необходимо в текстовое поле **Position editor** соответствующей линии ввести [1000, 0.95, 3000, 0.95], нажав затем кнопку **Done**.

Далее необходимо указать настраиваемые параметры: K_p , K_I , K_d .

В меню **Optimization** рабочего окна блока **NCD Outputport** выберите команду **Parameters**.

Это приведет к открытию диалогового окна задания оптимизируемых параметров и интервала дискретизации – **Optimization Parameters** (рис. 74).

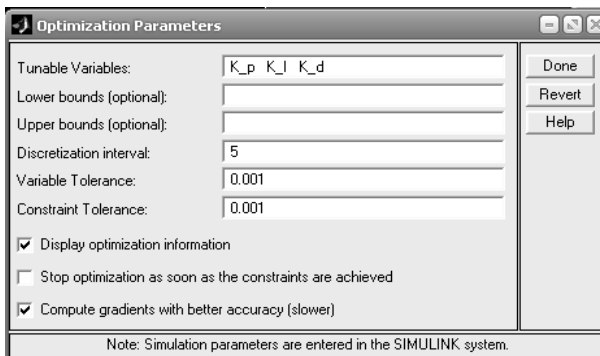


Рис. 74. Окно задания оптимизируемых параметров блока **NCD Outputport**

В текстовое поле **Tunable Variables** введите имя оптимизируемой переменной. Если таких переменных несколько, как в нашем случае – три, то их имена разделяются пробелами.

В текстовое поле **Discretization Interval** вводится значение интервала дискретизации при моделировании переходного процесса, выраженное в секундах.

В качестве примера на рис. 71 показаны три оптимизируемых параметра (K_p , K_I , K_d) и установлено значение интервала дискретизации, равное 5 с.

Для подтверждения ввода нажмите кнопку **Done**.

Для запуска процесса оптимизации в меню рабочего окна блока **NCD Output** выберите команду **Optimization→Start**.

После успешного окончания процесса оптимизации в окне ввода формул **Command Window** появится соответствующее сообщение: **Optimization Converged Successfully** (Оптимизация выполнена успешно). В рабочем окне блока **NCD Output** будет отображен график переходного процесса, соответствующего оптимальным настройкам ПИД-регулятора.

Оптимизированные значения коэффициентов K_p , K_I , K_d можно просмотреть, выполнив двойной щелчок левой клавишей мыши на значке соответствующей переменной в окне **Workspace**, либо в окне **Command Window**, введя в строке ввода формул следующее выражение:

>> K_p , K_I , K_d

Запустите моделирование работы САР, для получившейся переходной функции по задающему воздействию определите значения показателей качества – перерегулирования σ и времени регулирования $t_{рег}$. Полученный график и значения показателей качества включите в отчет.

Получите переходную функцию по возмущающему воздействию.

Для этого отсоедините выход компонента **Step** от входа компонента **Set_value** и соедините со входом компонента **W_of**. Таким образом, подаваемый на систему входной сигнал будет являться возмущающим воздействием.

Запустите моделирование работы САР, для получившейся переходной функции по возмущающему воздействию определите значения показателей качества – перерегулирования σ и времени

регулирования $t_{\text{рег}}$. Полученный график и значения показателей качества включите в отчет.

Отсоедините выход компонента **Step** от входа компонента **W_of** и снова соедините со входом компонента **Set_value**.

Запишите в отчет значения коэффициентов K_p , K_I , K_d , полученные с помощью блока **NCD Outport**, и передаточную функцию ПИД-регулятора с этими значениями.

Сравните две полученные формулы и сделайте вывод о синтезе ПИД-регулятора с помощью метода Зиглера-Никольса и компонента **NCD Outport**.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Компьютерная модель исследуемой САР с ПИД-регулятором в качестве устройства управления, созданная в Simulink.
3. Результаты настройки ПИД-регулятора по методу Зиглера-Никольса: значение коэффициента пропорциональной составляющей регулятора K_u , при котором в системе наблюдаются незатухающие колебания переходного процесса, значение периода незатухающих колебаний T_u ; значения коэффициентов K_p , K_I , K_d , рассчитанные по формуле (64).
4. Графики переходных функций САР с оптимальными значениями параметров ПИД-регулятора, полученными по методу Зиглера-Никольса, по задающему и возмущающему воздействиям с указанием значений показателей качества регулирования.
5. Результаты настройки ПИД-регулятора с помощью блока **NCD Outport**: значения коэффициентов K_p , K_I , K_d .
6. Графики переходных функций САР с оптимальными значениями параметров ПИД-регулятора, полученными с помощью блока **NCD Outport**, по задающему и возмущающему воздействиям с указанием значений показателей качества регулирования.
7. Сравнение результатов настройки ПИД-регулятора различными методами.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования САР и запишите его передаточную функцию.

2. В чем заключается задача синтеза САР?
3. Приведите формулы метода Зиглера-Никольса настройки ПИД-регулятора.
4. Опишите порядок настройки ПИД-регулятора с помощью компонента NCD Output.

Исходные данные по вариантам

Вариант	T1, с	T2, с
1	80	250
2	100	250
3	100	200
4	100	300
5	150	250

Лабораторная работа № 10
**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХПОЗИЦИОННОГО
РЕГУЛЯТОРА И ДВУХПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Цель работы: ознакомиться с принципом действия двухпозиционного регулятора; исследовать двухпозиционный регулятор на примере регулятора температуры и режимы работы двухпозиционных систем на примере САР температуры сушильной камеры.

Задание:

1. Изучить принцип действия двухпозиционного регулятора.
2. Запрограммировать измеритель-регулятор температуры МТ2141 как двухпозиционный регулятор температуры сушильной камеры.
3. Снять статическую характеристику регулятора как функцию сопротивления датчика. По снятой характеристике рассчитать, действительно ли регулятор срабатывает при заданных температурах.
4. В программе компьютерного моделирования Simulink составить компьютерную модель двухпозиционной САР температуры в сушильной камере и смоделировать ее работу.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Лабораторная установка выполнена на базе цифрового измерителя-регулятора МТ2141, предназначенного для измерения и регулирования температуры (рис. 75), магазина сопротивлений, имитирующего датчик температуры – термометр сопротивления.



Рис. 75. Внешняя панель измерителя-регулятора температуры МТ2141

Регулятор позволяет реализовать двух- и трехпозиционные законы регулирования и ПИД-закон регулирования в нелинейной приближенной реализации. Для этого регулятор снабжен двумя программируемыми каналами регулирования с релейными выходами К1, К2.

К регулятору в качестве датчика могут быть подключены платиновые и медные термометры сопротивления 100П и 100М с номинальным сопротивлением при 0 °С равным 100 Ом, термопары, токовые и потенциальные датчики.

Для моделирования режимов работы позиционных САУ на ЭВМ используется пакет компьютерного моделирования Simulink, входящий в состав системы компьютерных расчетов MATLAB.

Выполнение работы

1. Принцип действия двухпозиционного регулятора

Позиционной называют САУ, в которой управляющее воздействие на объект ступенчато изменяется в зависимости от уровня ошибки.

Соответственно, **позиционным** называют закон регулирования, когда управляющее воздействие на объект принимает ряд постоянных дискретных значений (изменяется ступенчато) в зависимости от ошибки системы.

Двухпозиционными называются регуляторы, выходной сигнал *и* которых (сигнал управления) имеет два фиксированных значения, и переход с одного на другое происходит скачком.

Позиционные регуляторы обязательно включают в себя так называемые элементы прерывного действия, а именно, релейные элементы. Статические характеристики, связывающие входной и выходной сигналы наиболее распространенных релейных элементов, приведены на рис. 76. Реле с характеристикой на рис. 76, *а* называют **идеальным**, с характеристикой на рис. 76, *б* – реле с **зоной неоднозначности** ($\pm a$).

В двухпозиционных регуляторах под **входным сигналом** $x_{ВХ}$ понимается отклонение регулируемой величины от заданного значения $x_{Зад}$, т. е., сигнал ошибки e , а под **выходным сигналом** $x_{ВЫХ}$ – управляющий сигнал *и*.

Обычно двухпозиционные регуляторы работают следующим образом: полностью прекращают приток вещества или энергии

к объекту регулирования при превышении регулируемой величины заданного уровня $x_{\text{зад}}$ и полностью восстанавливают этот приток при отклонении регулируемой величины от заданного уровня $x_{\text{зад}}$ в меньшую сторону. Сигнал управления $x_{\text{вых}}$ имеет при этом лишь два значения: $x_{\text{вых}1}$ и $x_{\text{вых}2}$ (рис. 76). Одно из значений выходного сигнала двухпозиционного регулятора в этом случае соответствует отключенному состоянию реле, а второе – включенному.

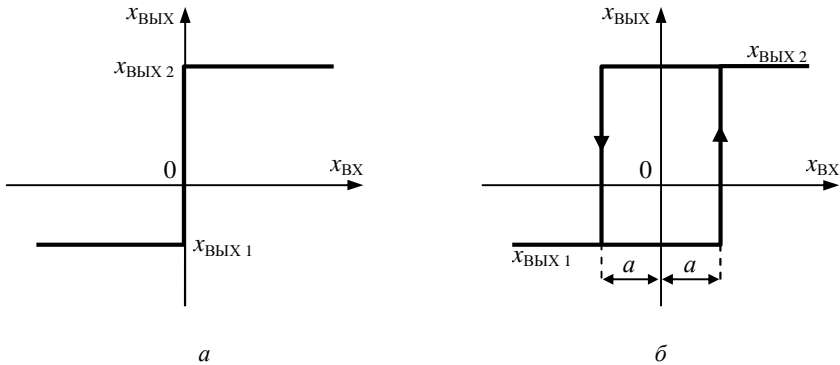


Рис. 76. Статические характеристики релейных элементов: идеального (а) и с зоной неоднозначности (б)

Примерами позиционных САУ являются системы регулирования температуры в холодильнике, температуры подошвы утюга. Эти системы являются двухпозиционными, поскольку управляющее воздействие на объект принимает два значения. Например, при пониженной температуре подошвы утюга питание нагревательного элемента включается, при повышенной температуре – выключается.

В сельском хозяйстве позиционное регулирование применяется в системах регулирования микроклимата в животноводческих помещениях, регулирования температуры инкубаторов, температуры теплоносителя зерновых сушилок и т. д.

Рассмотрим работу двухпозиционной САР на примере САР температуры сушильной камеры с одним нагревательным элементом ЕК. Принципиальная схема двухпозиционной САР изображена на рис. 77, ее структурная схема – на рис. 78.

Воздух в сушильной камере нагревается элементом ЕК. Температура воздуха θ регулируется двухпозиционным регулятором А. При включении системы температура в камере меньше заданной $\theta_0 < \theta_{зАд}$, сигнал ошибки положителен и превышает половину зоны неоднозначности a : $e = \theta_{зАд} - \theta_0 > a$. Реле на выходе регулирующего блока А включается, и его замыкающий контакт А включает магнитный пускатель КМ, который своими контактами запитывает нагревательный элемент ЕК. Начинается нагрев камеры. При повышении температуры до заданной $\theta_{зАд}$ плюс половина зоны неоднозначности a , когда сигнал ошибки станет равен $e = -a$, реле на выходе регулирующего блока выключится, контакт А разомкнется, магнитный пускатель КМ выключится и обесточит нагревательный элемент ЕК. В результате температура в сушильной камере начнет снижаться. Реле снова включится, когда сигнал ошибки станет равен $e = +a$.

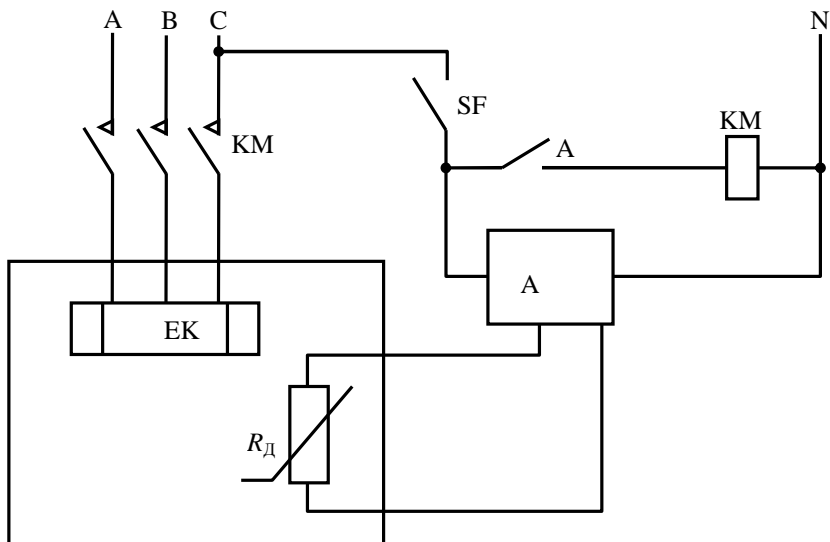


Рис. 77. Принципиальная схема двухпозиционной САР температуры сушильной камеры:
 ЕК – нагревательный элемент; А – регулирующий блок,
 R_d – датчик (термометр сопротивления);
 А – контакт выходного реле регулирующего блока

При составлении структурной схемы нагреватель ЕК отнесен к объекту управления. Коэффициент передачи датчика перенесен в релейную характеристику регулирующего блока, поэтому сигнал ошибки e имеет размерность температуры.

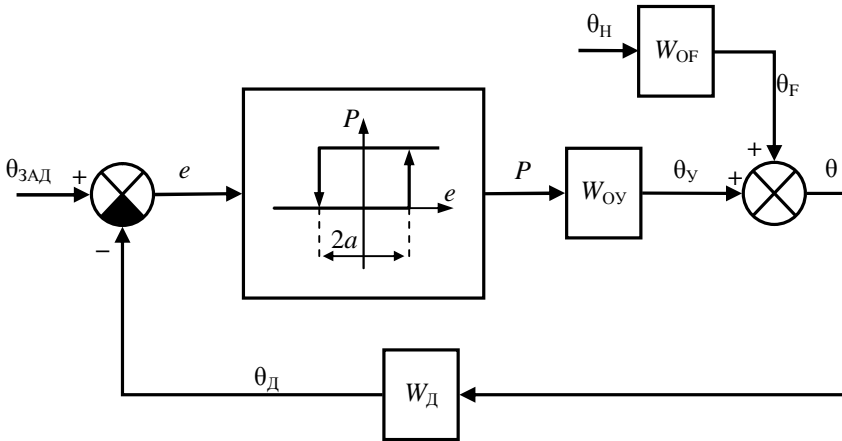


Рис. 78. Структурная схема двухпозиционной САР температуры сушильной камеры:

- $\theta_{\text{зад}}$ – заданная температура; e – сигнал ошибки; P – мощность нагревателя;
- θ_{H} – температура наружного воздуха (возмущающее воздействие);
- θ_{F} – приращение температуры в камере за счет изменения наружной температуры;
- θ_{y} – приращение температуры в камере от работы нагревателя;
- θ – температура в камере; $\theta_{\text{д}}$ – сигнал датчика;
- $2a$ – ширина зоны неоднозначности регулятора;
- $W_{\text{Оу}}$ – передаточная функция сушильной камеры по управляющему воздействию;
- $W_{\text{ОФ}}$ – передаточная функция сушильной камеры по возмущающему воздействию,
- $W_{\text{Д}}$ – передаточная функция датчика

Процесс нагрева и охлаждения воздуха в сушильной камере повторяется. Таким образом, в сушильной камере устанавливается режим периодического нагрева и охлаждения.

Такие установившиеся режимы работы называются **автоколебательными**. Процесс регулирования температуры в сушильной камере после включения САР температуры изображен на рис. 79.

Размах автоколебаний больше ширины зоны неоднозначности $2a$, что обусловлено *инерционностью* датчика и объекта управления. В нашем примере за счет инерционности датчика изменение

сигнала ошибки $e(t)$ отстает по времени от изменения температуры в камере $\theta(t)$, поэтому реле срабатывает позже. Кроме того, снижение (повышение) температуры начинается не сразу после срабатывания реле, а после того, как нагревательный элемент несколько охладится (нагреется).

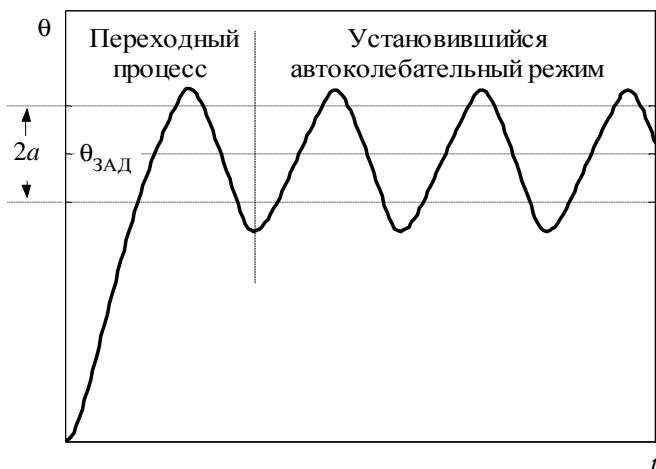


Рис. 79. Процесс регулирования температуры в сушильной камере, обеспечиваемый двухпозиционной САР

При увеличении задающего воздействия (в нашем случае температуры $\theta_{\text{зад}}$) автоколебания несколько смещаются вверх, при снижении – вниз.


При увеличении возмущающего воздействия (в нашем случае температуры наружного воздуха $\theta_{\text{н}}$) – изменяется период и форма автоколебаний, а также скважность импульсов включения/отключения регулятора.


Показателями качества регулирования для двухпозиционных САР являются *максимальное отклонение* регулируемой величины от заданного значения (в нашем примере – от заданной температуры $\theta_{\text{зад}}$) и *частота и амплитуда автоколебаний*. Быстродействие системы определяется временем установления автоколебаний.


Параметрами настройки регулятора являются *заданное значение* регулируемой величины (в нашем примере – $\theta_{\text{зад}}$) и *ширина зоны неоднозначности* $2a$.


2. Программирование измерителя-регулятора температуры МТ2141 на двухпозиционный регулятор температуры сушильной камеры

Работа прибора определяется значениями параметров, которые программируются оператором.

У прибора имеется три уровня программирования: конфигурационный, параметрический и рабочий. Переход от одного уровня ко второму осуществляется при нажатом состоянии операторной кнопки .


1.1. Для задания параметров на конфигурационном уровне программирования Conf необходимо на панели регулятора нажать кнопку  и удерживать ее до тех пор, пока на индикаторе прибора не появится сообщение Conf.


Программируемые параметры появляются последовательно при нажатии операторной кнопки .



На данном уровне необходимо задать положение Pnt – x1. Выбор разряда производится нажатием кнопки .

Выбранные значения подтверждаются одновременным нажатием операторных кнопок  + , причем первой нажимается кнопка .






Выход из данного уровня программирования осуществляется одновременным нажатием кнопок  + .

1.2. Для задания параметров на параметрическом уровне программирования Par необходимо на панели регулятора нажать кнопку  и удерживать ее до тех пор, пока на индикаторе прибора не появится сообщение Par.

Программируемые параметры появляются последовательно при нажатии операторной кнопки .






Откройте параметрический уровень программирования. Введите значение ширины зоны неоднозначности $2a$ для выхода K1 (HYS1). Для этого нажимайте операторную кнопку , пока на индикаторе прибора не появится сообщение HYS1, затем выберите численного значения ширины зоны неоднозначности нажатием операторной кнопки . Подтвердите выбранное значение

одновременным нажатием операторных кнопок  +  , причем первой нажимается кнопка .

Далее выберите направление регулирования. Для этого нажмите операторную кнопку  , пока на индикаторе не появится сообщение dir. С помощью операторной кнопки  выберите направление регулирования (нагрев) и подтвердите выбор одновременным нажатием операторных кнопок  +  , причем первой нажимается кнопка .

Выйдите из параметрического уровня программирования, одновременно нажав кнопки  + .

1.3. На рабочем уровне задаем значение температуры $\theta_{\text{зад}}$ (центр ширины зоны неоднозначности 2а).

Нажимайте операторную кнопку  и, не отпуская ее, нажмите операторную кнопку  , затем с помощью операторной кнопки  выберите заданное значение температуры $\theta_{\text{зад}}$ и зафиксируйте одновременным нажатием операторных кнопок  + .

3. Снятие статической характеристики регулятора

В данной работе регулятор запрограммирован на термометр сопротивления 100М ($W_{100} = 1,426$). Это значит, что датчик при температуре 0°C имеет номинальное сопротивление 100 Ом, а при температуре 100 °C – сопротивление 142,6 Ом, поэтому номинальная статическая характеристика датчика описывается формулой:

$$R_{\text{д}} = 100 + 0,426 \theta, \quad (66)$$

где $R_{\text{д}}$ – сопротивление датчика, Ом;
 θ – температура, °C.

С помощью магазина сопротивлений увеличивайте значение сопротивления датчика вначале через 1 Ом, при приближении к запрограммированной температуре выключения реле К1 – через 0,1 Ом, и зафиксируйте значение сопротивления $R_{\text{д}}$ и θ ,

при которых происходит выключение реле К1. Затем аналогичным образом уменьшайте значение сопротивления магазина и зафиксируйте значение сопротивления R_d и θ , при которых происходит включение реле К1. Результаты внесите в табл. 9.

Таблица 9

Статическая характеристика двухпозиционного регулятора

R_d , Ом	100	101	102	...
θ , °С	0			...
$\theta_{расч}$, °С				
Состояние реле К ₁	+			

Постройте по данным табл. 9 статическую характеристику как функцию сопротивления датчика для регулирующего выхода К1, на ней покажите ширину зоны неоднозначности.

Рассчитайте по экспериментальной характеристике, при каких температурах срабатывает регулятор, используя статическую характеристику датчика (66). Сравните полученные значения с запрограммированными параметрами порогов срабатывания ($\theta_{зАд} \pm a$).

Сделайте выводы о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.

4. Компьютерное моделирование работы САР

Для исследования режимов работы позиционных САУ в настоящее время наиболее точным, удобным и наименее трудоемким методом является компьютерное моделирование, в процессе которого и определяются значения параметров настройки регулятора.

Для компьютерного моделирования работы двухпозиционной САР за основу возьмем структурную схему САР температуры в сушильной камере, изображенную на рис. 65 (см. лабораторную работу № 7).

В качестве регулятора используется двухпозиционное реле, математическое описание работы которого, в соответствии с рис. 76, 78, имеет следующий вид:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } e \geq a; \\ 0, & \text{при } e \leq -a; \\ 1, & \text{при } -a < e < a \text{ и } \frac{de}{dt} < 0; \\ 0, & \text{при } -a < e < a \text{ и } \frac{de}{dt} > 0. \end{cases} \quad (67)$$

Для упрощения схемы будем считать, что значение коэффициента передачи датчика K_d учтено в релейной характеристике регулирующего блока, т. е., что регулятор «настроен» на подключение данного конкретного датчика температуры, как это действительно имело место в случае регулятора МТ2141 в пунктах 2 и 3 данной лабораторной работы. Будем полагать, что $K_d = K_{зад} = 1$. Отсюда следует, что величина выходного сигнала датчика и задатчика – температура, выраженная в градусах по Цельсию.

Таким образом, структурная схема рассматриваемой САР принимает вид, показанный на рис. 80.

Выполните запуск пакета компьютерного моделирования Simulink так, как это указано при описании выполнения лабораторной работы № 1.

В окне ввода команд Command Window в строке ввода ввести следующие команды:

```
>> clear all; close all; clc;
>> global T_ext % наружная температура в градусах Цельсия
>> global T_req % заданная температура в градусах Цельсия
>> global a % полуширина зоны неоднозначности регулятора
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта
>> global T_sens % постоянная времени датчика
>> global K_mech % коэффициент исполнительного устройства
>> T_ext = ; T_req = ;
>> a =;
>> T1= ; T2 = ;
>> K_obj = 1;
>> T_sens = 20;
>> K_mech = 50; % мощность нагревателя в ваттах
```

После знаков равенства введите значения параметров (по вариантам).

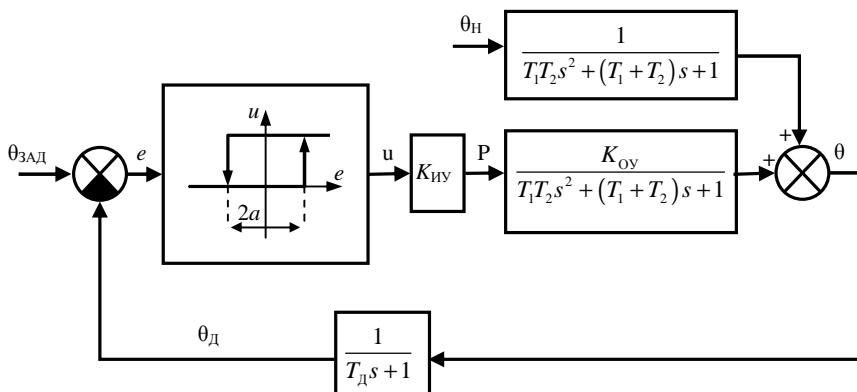


Рис. 80. Структурная схема двухпозиционной САР температуры в сушильной камере:

θ – управляемая величина (температура в камере);

$\theta_{зад}$ – заданное значение температуры в камере;

θ_d – значение температуры, показываемое датчиком; e – ошибка управления;

u – сигнал управления; a – значение полуширины зоны неоднозначности;

P – управляющее воздействие на объект со стороны исполнительного устройства (мощность нагревателя); θ_H – возмущающее воздействие на объект (изменение наружной температуры)

Далее на основе структурной схемы САР на рис. 80 создадим в Simulink модель САР с двухпозиционным регулятором. В качестве начальной основы можно взять модель САР, созданную при выполнении лабораторной работы № 9. В модель необходимо внести следующие *изменения*.

- 1) Удалите компоненты PID Controller, Set_value и Step.
- 2) Вместо удаленного компонента PID Controller в качестве регулятора используйте компонент Relay, находящийся в окне Simulink Library Browser в библиотеке компонентов Simulink на вкладке Discontinuities. Перетащите значок Relay в окно редактирования модели и расположите на месте удаленного компонента. Вход Relay (сигнал ошибки e) соедините с выходом сравнивающего устройства, выход Relay (сигнал управления u) соедините со входом исполнительного устройства. Двойным щелчком левой клавишей мыши на значке Relay откройте окно задания параметров данного блока Block Parameters: Relay. В нем в поле Switch on point (Точка включения) введите полуширину

зоны неоднозначности a , в поле **Switch off point** (Точка отключения) введите $-a$. В полях **Output when on** (Значение на выходе во включенном состоянии) и **Output when off** (Значение на выходе в отключенном состоянии) оставьте заданные по умолчанию значения: 1 и 0, соответственно. Ввод данных подтвердите нажатием кнопок **Apply** и **OK**.

3) Двойным щелчком левой клавишей мыши на элементе **Sensor** откройте окно задания его параметров **Block parameters: Sensor** и в поле **Numerator** (Числитель передаточной функции) вместо K_{sens} введите 1, ввод подтвердите нажатием клавиш **Apply** и **OK**.

4) В качестве начального условия можно считать, что до начала процесса моделирования, т. е. при $t < 0$, САР была выключена, и в момент включения САР (при $t = 0$) температура внутри сушильной камеры была равна температуре снаружи: $\theta_0 = \theta_n$. Для задания начального условия используется компонент **Constant** (Источник постоянного по времени сигнала).


Два компонента **Constant** (расположены на вкладке **Sources** библиотеки **Simulink**) поочередно перетащите мышью в окно редактирования модели и расположите один из них слева от значка W_{of} , а второй – слева от значка **Sum**. Первому из элементов автоматически будет присвоено имя **Constant**, второму – **Constant1**.

Выход элемента **Constant1** соедините со входом «+» элемента **Sum**. На получившейся линии соединения щелкните правой клавишей мыши и во всплывающем меню выберите команду **Signal Properties** (Свойства сигнала). В открывшемся в результате этого диалоговом окне в поле **Signal name** (Имя сигнала) введите **T_req** (от англ. *required* – «требуемый»).

Нажмите **Apply** и **OK**. Элемент **Constant**, таким образом, служит для ввода в систему заданного значения температуры в сушильной камере. Двойным щелчком левой клавиши мыши на элементе **Constant** откройте диалоговое окно задания его параметров **Block parameters: Constant** и в поле **Constant value** (Значение постоянного сигнала) введите имя глобальной переменной **T_req**, после чего ввод подтвердите нажатием **Apply** и **OK**.

Элемент **Constant** будет служить для ввода в систему значения наружной температуры. Поэтому выход элемента **Constant** соедините со входом элемента **W_of**, на получившейся линии соединения задайте имя сигнала **T_ext** (от англ. *exterior* – «наружный»). В качестве значения постоянного сигнала элемента **Constant1** задайте имя соответствующей глобальной переменной **T_ext**.

б) В процессе моделирования работы САР необходимо отображать графики изменения во времени сигнала ошибки регулирования $e(t)$, сигнала управления $u(t)$ на выходе регулятора и температуры внутри сушильной камеры $\theta(t)$.

Двойным щелчком левой клавиши мыши на элементе **Scope** откройте его рабочее окно. Для отображения трех графиков сигналов в верхней части окна на панели инструментов выполните левой кнопкой мыши щелчок на кнопке **Parameters**  (второй слева), в появившемся всплывающем окне задания параметров в поле **Number of axes** введите число 3, нажмите **Apply** и **OK**.

После этого в окне редактирования модели (компонент **Scope** уже имеет три входа) верхний вход **Scope** соедините с линией сигнала **e** между выходом элемента сравнения **Sum** и входом регулятора **Relay**.


Второй вход **Scope** соедините с линией сигнала **u** между выходом регулятора **Relay** и входом исполнительного устройства.

Выход элемента **Object** соедините с третьим входом элемента **Scope**.

Приблизительный вид созданной графической модели исследуемой САР температуры в сушильной камере показан на рис. 81.

Сохраните построенную графическую модель САР в файл с именем **relay2_regulator.mdl**.

Для запуска процесса моделирования выполните команду меню **Simulation**→**Start**.

Открыв рабочее окно элемента **Scope**, можно видеть соответствующие графики изменения во времени сигналов $e(t)$, $u(t)$, $\theta(t)$. Для обеспечения наглядности отображения графиков можно развернуть рабочее окно **Scope** на весь экран, а также нажать на панели инструментов кнопку **Autoscale**  (автоматическое масштабирование).

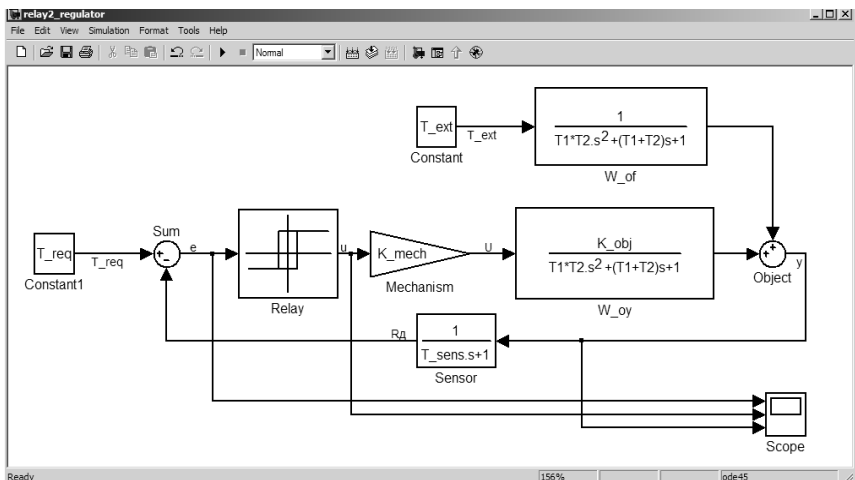


Рис. 81. Графическая модель САР с двухпозиционным регулятором

Проведите моделирование работы системы для нескольких различных значений наружной температуры (возмущающего воздействия на систему), полагая, что это изменение имеет форму ступенчатого воздействия, т. е. что в некоторый момент времени наружная температура достаточно быстро изменяется на несколько градусов. Оцените, как изменяются графики $e(t)$, $u(t)$, $\theta(t)$.

Графики поведения системы при двух различных возмущающих воздействиях $e(t)$, $u(t)$, $\theta(t)$ (по вариантам) включите в отчет.

Сделайте выводы о переходных и установившемся режимах работы двухпозиционных систем и изменении этих режимов при изменении возмущающего воздействия.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Результаты эксперимента (табл. 9).
3. Статическая характеристика регулятора в виде функции сопротивления датчика.
4. Расчетные температуры срабатывания регулятора.
5. Выводы о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.
6. Компьютерная модель исследуемой САР, созданная в Simulink.

7. Графики $e(t)$, $u(t)$, $\theta(t)$ поведения системы при двух различных возмущающих воздействиях.

8. Выводы о переходных и установившемся режимах работы двухпозиционных систем и изменении этих режимов при изменении возмущающего воздействия.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение позиционного закона регулирования, двухпозиционного закона регулирования.
2. Назовите параметры настройки двухпозиционных регуляторов.
3. Поясните смысл понятия «зона неоднозначности».
4. Как называется установившийся режим в двухпозиционных системах?
5. Назовите показатели качества регулирования двухпозиционных САР.
6. Как изменяются режимы работы двухпозиционных систем при изменении возмущающего воздействия?

Исходные данные по вариантам

Вариант	1	2	3	4	5
T1	80	100	100	150	150
T2	250	250	300	250	300
$\theta_{зад}$ (T_{req})	8	10	12	11	15
$2a$	4	2	2	4	2
θ_{H_1} (T_{ext_1})	4	7	7	6	0
θ_{H_2} (T_{ext_2})	7	10.5	11.5	10	14

Лабораторная работа № 11
**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХПОЗИЦИОННОГО
РЕГУЛЯТОРА И ТРЕХПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Цель работы: ознакомиться с принципом действия трехпозиционного регулятора; исследовать трехпозиционный регулятор на примере регулятора температуры и режимы работы трехпозиционных систем на примере САР температуры сушильной камеры.

Задание:

1. Изучить принцип действия трехпозиционных регуляторов.
2. Запрограммировать измеритель-регулятор температуры МТ2141 на трехпозиционный регулятор температуры сушильной камеры.
3. Снять статическую характеристику регулятора как функцию сопротивления датчика. По снятой характеристике рассчитать, действительно ли регулятор срабатывает при заданных температурах.
4. В программе компьютерного моделирования Simulink составить компьютерную модель трехпозиционной САР температуры в сушильной камере и смоделировать ее работу.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Цифровой измеритель-регулятор температуры МТ2141, предназначенный для измерения и регулирования температуры (см. рис. 75), магазин сопротивлений, имитирующий датчик температуры – термометр сопротивления, и ЭВМ для компьютерного моделирования режимов работы позиционных САУ с использованием пакета компьютерного моделирования Simulink, входящего в состав системы компьютерных расчетов MATLAB.

Выполнение работы

1. Трехпозиционные регуляторы

Трехпозиционными называются регуляторы, выходной сигнал *и* которых (сигнал управления) имеет три фиксированных значения, а переход от одного к другому значению происходит скачком (рис. 82).

Принципиальная схема трехпозиционной САР изображена на рис. 83, ее структурная схема изображена на рис. 84.

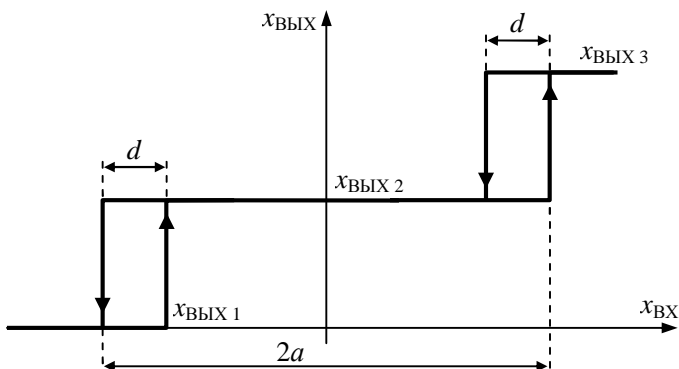


Рис. 82. Статическая характеристика трехпозиционного регулятора

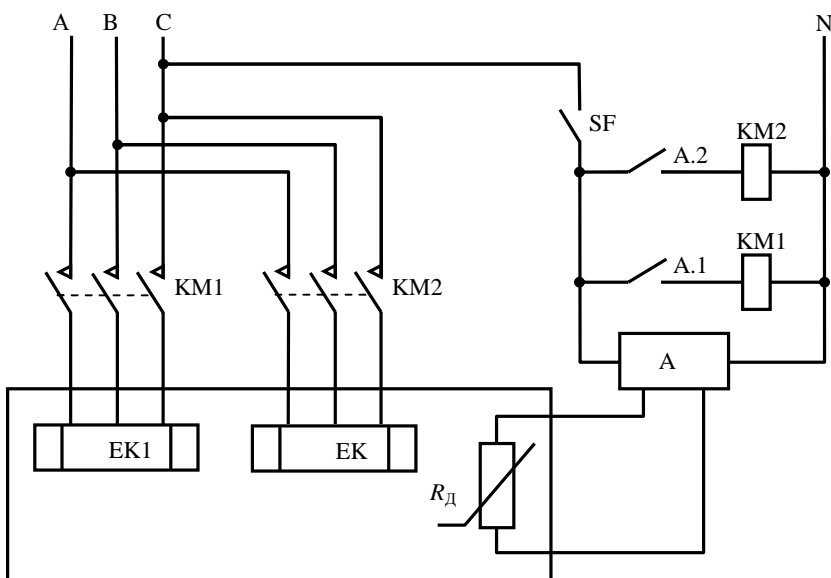


Рис. 83. Принципиальная схема трехпозиционной САР температуры сушильной камеры:

ЕК1, ЕК2 – нагревательные элементы; R_d – датчик (термометр сопротивления);
 А – регулирующий блок;
 А.1, А.2 – контакты выходных реле регулирующего блока

После включения системы срабатывают оба реле регулирующего блока А, поэтому пускатели КМ1 и КМ2 запитывают оба

нагревателя ЕК1 и ЕК2. Температура в сушильной камере быстро растет.

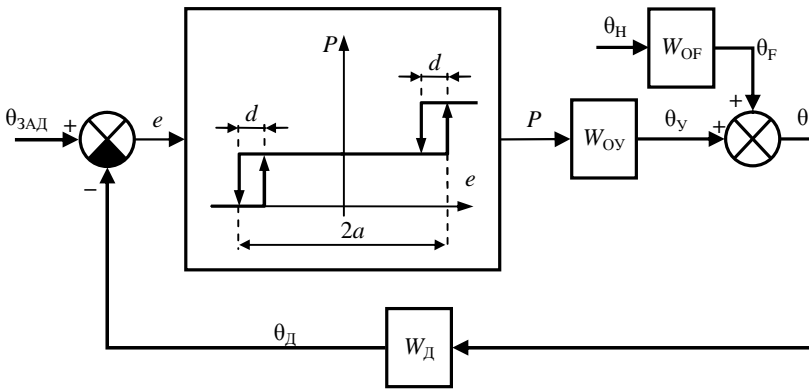


Рис. 84. Структурная схема трехпозиционной САР температуры сушильной камеры:

- $\theta_{\text{зад}}$ – заданная температура; e – сигнал ошибки; P – мощность нагревателя;
- $\theta_{\text{д}}$ – сигнал датчика; $\theta_{\text{н}}$ – температура наружного воздуха;
- $\theta_{\text{ф}}$ – приращение температуры в камере за счет изменения наружной температуры;
- $\theta_{\text{у}}$ – приращение температуры в камере от работы нагревателя;
- θ – температура в камере; $2a$ – ширина зоны нечувствительности;
- d – зоны неоднозначности (дифференциалы);
- W_{OY} – передаточная функция сушильной камеры по управляющему воздействию;
- W_{OF} – передаточная функция сушильной камеры по возмущающему воздействию;
- $W_{\text{д}}$ – передаточная функция датчика

Когда температура входит в зону нечувствительности $2a$ плюс дифференциал d , т. е. когда $\theta(t) \geq \theta_{\text{зад}} - (a - d)$, ошибка регулирования становится меньше $e \leq a - d$, и первое реле отключается, пускатель КМ1 обесточивает нагревательный элемент ЕК1. Далее возможны три варианта работы системы.

1. Если мощности второго нагревательного элемента ЕК2 **не хватает для дальнейшего повышения температуры или удержания его в зоне нечувствительности** (что может быть при достаточно низкой наружной температуре), температура в камере начинает снижаться. После выхода из зоны нечувствительности нагревательный элемент ЕК1 опять включится, и температура начнет подниматься. В результате возникают автоколебания около нижней зоны неоднозначности d (рис. 85, график 1).

2. Если мощности второго нагревательного элемента ЕК2 *хватает для удержания температуры в зоне нечувствительности*, то в системе устанавливается статический режим (рис. 85, график 2).

3. Если мощности второго нагревателя ЕК2 *хватает для дальнейшего повышения температуры*, то после выхода температуры из зоны нечувствительности, т. е. при $\theta(t) \geq \theta_{3\text{АД}} + a$, срабатывает второе реле, размыкается контакт А.2 и пускатель КМ2 обесточивает нагревательный элемент ЕК2. Температура начинает понижаться. После входа температуры в зону нечувствительности, т. е. при $\theta(t) \leq \theta_{3\text{АД}} + a - d$, когда ошибка становится $e \leq a - d$, второе реле выключается, контакт А.2 замыкается, пускатель запитывает нагревательный элемент ЕК2, температура начинает повышаться. Возникает режим автоколебаний около верхней зоны неоднозначности d (рис. 85, график 3).

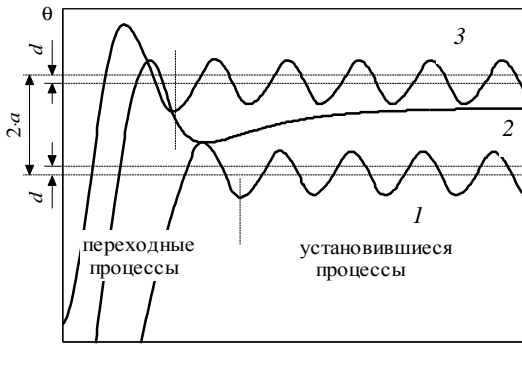


Рис. 85. Процесс регулирования температуры в сушильной камере, обеспечиваемый трехпозиционной системой:

- 1 – режим автоколебаний около нижней зоны неоднозначности d ;
- 2 – статический установившийся режим;
- 3 – режим автоколебаний около верхней зоны неоднозначности d

В работающей системе переход из одного режима в другой происходит при изменении возмущающего воздействия (в нашем примере – при изменении температуры наружного воздуха). При повышении $\theta_{\text{н}}$ автоколебания смещаются вверх, при понижении – вниз.

Если система неправильно разработана или настроена, например, при установке слишком узкой зоны нечувствительности,

в трехпозиционной системе могут возникать трехпозиционные автоколебания (рис. 86). При этом режим работы сходен с режимом работы двухпозиционной системы. Как правило, такая работа трехпозиционной системы неприемлема.

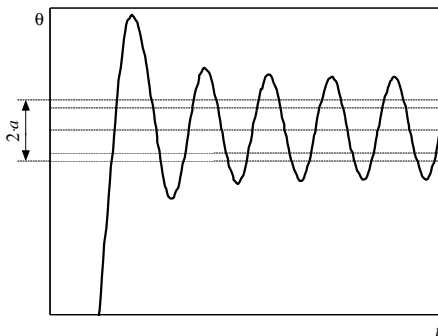


Рис. 86. Режим трехпозиционных автоколебаний в трехпозиционной системе

Параметрами настройки регулятора трехпозиционной системы являются *заданное значение* регулируемой величины (в нашем случае $\theta_{\text{зад}}$) и *ширина зоны нечувствительности* $2a$. В некоторых регуляторах можно также изменять *дифференциал* d .



Параметрами качества регулирования являются *максимальное отклонение* регулируемой величины от заданного значения, *частота* и *амплитуда* автоколебаний. Быстродействие системы определяется временем перехода системы в установившийся режим работы.

2. Программирование измерителя-регулятора температуры МТ2141 на трехпозиционный регулятор температуры сушильной камеры

Трехпозиционный закон регулирования задается настройкой зон неоднозначности и их центров для реле К1 и К2. При этом ширина зоны нечувствительности равна разности $\theta_{\text{зад}}$ для реле К1 и К2 плюс ширина зоны неоднозначности (дифференциал d) этих реле.

Работа прибора определяется значениями параметров, которые программируются оператором.

Выполните программирование измерителя-регулятора температуры МТ2141 по вариантам (см. порядок выполнения лабораторной работы № 10).

Центр неоднозначности для выхода К2 задается аналогично выходу К1. Разница заключается в том, что вместо кнопки  нажимается кнопка .

Следует иметь в виду, что центр срабатывания реле К2 должен отстоять достаточно далеко от центра срабатывания реле К1.

3. Снятие статической характеристики регулятора

Как и в работе № 10, номинальная статическая характеристика датчика описывается формулой (63).

С помощью магазина сопротивлений увеличивайте значение сопротивления датчика вначале через 1 Ом, при приближении к запрограммированным температурам выключения реле К1 и К2 – через 0,1 Ом, и зафиксируйте значения R_{12} , R_{22} , θ_{12} , θ_{22} , при которых происходит выключение реле К1 и К2. Затем аналогичным образом уменьшайте сопротивление магазина и зафиксируйте значения R_{11} , R_{21} , θ_{11} , θ_{21} , при которых происходит включение реле К1 и К2. Результаты внесите в табл. 10.

Постройте статическую характеристику как функцию сопротивления датчика для регулирующих выходов К1 и К2, покажите на ней ширину зон нечувствительности и неоднозначности (дифференциалы d).

Таблица 10

Статическая характеристика трехпозиционного регулятора

R_d , Ом	100	101	102	...
θ , °С	0			...
$\theta_{расч}$, °С				
Состояние реле К ₁	+			
Состояние реле К ₂	+			

Рассчитайте по экспериментальной характеристике, при каких температурах срабатывает регулятор, используя статическую характеристику датчика. Сравните полученные значения с запрограммированными параметрами порогов срабатывания.

Сделайте выводы о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.

4. Компьютерное моделирование работы САР

Для компьютерного моделирования работы трехпозиционной САР за основу следует взять структурную схему САР температуры в сушильной камере, изображенную на рис. 87. В качестве регулятора используется трехпозиционное реле.

Для упрощения схемы будем считать, что значение коэффициента передачи датчика K_d учтено в релейной характеристике регулирующего блока, т. е., что регулятор «настроен» на подключение данного конкретного датчика температуры, как это действительно имело место в случае регулятора МТ2141 в пунктах 2 и 3 данной лабораторной работы т. е., будем полагать, что $K_d = K_{зАд} = 1$. Отсюда следует, что величина выходного сигнала датчика и задатчика – температура, выраженная в градусах по Цельсию.

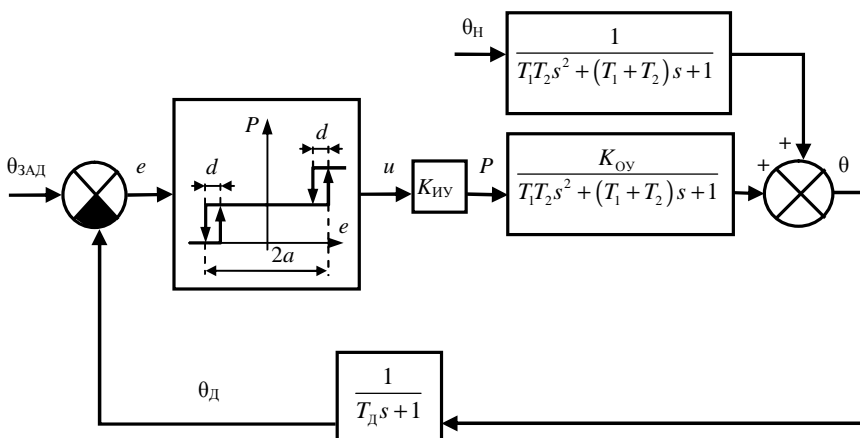


Рис. 87. Структурная схема трехпозиционной САР температуры в сушильной камере:

- θ – управляемая величина (температура в камере);
- $\theta_{зАд}$ – заданное значение температуры в камере;
- $\theta_д$ – значение температуры, показываемое датчиком; e – ошибка управления;
- u – сигнал управления; P – управляющее воздействие на объект со стороны исполнительного устройства (мощность нагревателя);
- $\theta_н$ – возмущающее воздействие на объект (изменение наружной температуры)

Выполните запуск пакета компьютерного моделирования Simulink так, как это указано при описании выполнения лабораторной работы № 1.

Введите в MATLAB заданные преподавателем значения параметров схемы. Для этого в окне ввода команд Command Window в строке ввода введите следующие команды:

```
>> clear all; close all; clc;
>> global T_ext % наружная температура в градусах Цельсия
>> global T_req % заданная температура в градусах Цельсия
>> global d % зона неоднозначности регулятора
>> global a % полуширина зоны нечувствительности
% регулятора
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта
>> global T_sens % постоянная времени датчика, с.
>> global K_mech % коэффициент исполнительного устройства
>> T_req = ; T_ext = 0;
>> d = ; a = ;
>> T1 = ; T2 = ;
>> K_obj = 1;
>> T_sens = 20;
>> K_mech = 25; % мощность нагревателя в ваттах
```

После знаков равенства нужно ввести заданные значения параметров (по вариантам).

Далее на основе структурной схемы САР (см. рис. 84) создадим в Simulink модель САР с трехпозиционным регулятором. В качестве начальной основы можно взять изображенную на рис. 81 модель САР, созданную при выполнении предыдущей лабораторной работы № 10. В данную модель необходимо внести следующие изменения:

1) добавьте еще один компонент типа **Relay**, находящийся в окне **Simulink Library Browser** в библиотеке компонентов **Simulink** на вкладке **Discontinuities**. При перетаскивании в окно редактирования модели новому компоненту будет автоматически присвоено имя **Relay1**.

2) удалите линию связи между выходом первого реле **Relay** и входом исполнительного устройства. Между двумя этими значками поместите еще один суммирующий элемент **Sum**, ему автоматически будет присвоено имя **Sum1**. Входы сумматора

Sum1 соедините с выходами реле Relay и Relay1, а выход сумматора – со входом исполнительного устройства, а также – со вторым входом элемента Scope.

Таким образом, в данной схеме трехпозиционный регулятор моделируется с помощью двух двухпозиционных реле: Relay и Relay1.

3) Задайте параметры настройки трехпозиционного регулятора. Для этого двойным щелчком левой клавишей мыши на значке Relay откройте окно задания параметров данного блока Block Parameters: Relay. В поле Switch on point (Точка включения) введите $-a + d$, в поле Switch off point (Точка отключения) введите $-a$. В полях Output when on (Значение на выходе во включенном состоянии) и Output when off (Значение на выходе в отключенном состоянии) оставьте заданные по умолчанию значения: 1 и 0, соответственно. Ввод данных подтвердите нажатием кнопок Apply и ОК.

Аналогично для блока Relay1 задайте следующие параметры: a – для точки включения и $a - d$ – для точки выключения.

Приблизительный вид созданной графической модели исследуемой САР температуры в животноводческом помещении показан на рис. 88.

Сохранить построенную графическую модель САР в файл с именем relay3_regulator.mdl.

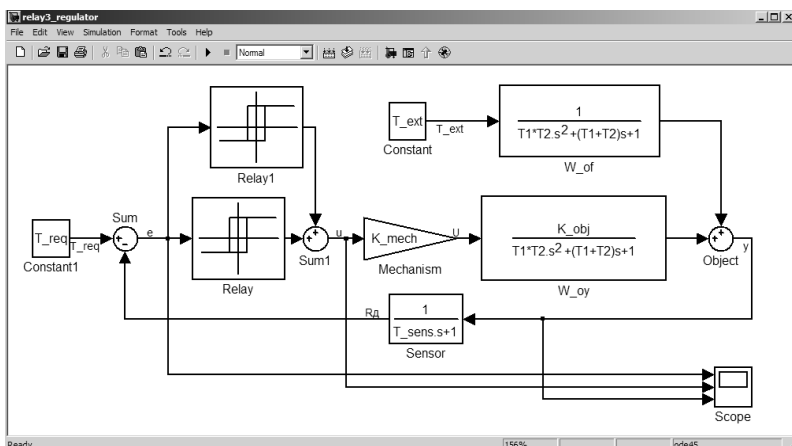



Рис. 88. Графическая модель САР с трехпозиционным регулятором

Для запуска процесса моделирования выполните команду меню **Simulation**→**Start**.

Открыв затем рабочее окно элемента **Scope**, можно видеть соответствующие графики изменения во времени сигналов $e(t)$, $u(t)$, $\theta(t)$. Для обеспечения наглядности отображения графиков можно развернуть рабочее окно **Scope** на весь экран, а также нажать на панели инструментов кнопку **Autoscale**  (Автоматическое масштабирование).

Промоделируйте работу САР с различными возмущающими воздействиями. Найдите значения наружной температуры, иллюстрирующие три типа автоколебаний. Графики поведения системы при найденных возмущающих воздействиях $e(t)$, $u(t)$, $\theta(t)$ включите в отчет.

Сделайте выводы о переходных и установившемся режимах работы трехпозиционных систем и изменении этих режимов при изменении возмущающего воздействия.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Результаты эксперимента (табл. 10).
3. Статическая характеристика регулятора в виде функции сопротивления датчика.
4. Расчетные температуры срабатывания регулятора.
5. Выводы о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.
6. Компьютерная модель исследуемой САР, созданная в Simulink.
7. Графики $e(t)$, $u(t)$, $\theta(t)$ поведения системы при трех различных возмущающих воздействиях, иллюстрирующие три типа автоколебаний.
8. Выводы о переходных и установившемся режимах работы трехпозиционных систем и изменении этих режимов при изменении возмущающего воздействия.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение трехпозиционного закона регулирования.
2. Назовите параметры настройки трехпозиционных регуляторов.

3. Поясните разницу между понятиями зона нечувствительности и зона неоднозначности.

4. В каком установившемся режиме работают трехпозиционные системы?

5. Назовите показатели качества регулирования трехпозиционных САР.

6. Как изменяются режимы работы трехпозиционных систем при изменении возмущающего воздействия?

Исходные данные по вариантам

Вариант	1	2	3	4	5
T1	80	100	100	150	150
T2	250	250	300	250	300
$\theta_{зад1}$	8	10	12	11	15
$\theta_{зад2}$ (T_req)	18	20	22	21	25
$2a$	4	2	2	4	2
d	0,5	0,25	0,25	0,5	0,25

Модуль 4. ДИСКРЕТНЫЕ, ОПТИМАЛЬНЫЕ, РОБАСТНЫЕ, АДАПТИВНЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Лабораторная работа № 12 ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Цель работы: изучить основные методы цифрового регулирования измеряемого сигнала.

Задание:

1. Исследовать схему блока сравнения.
2. Исследовать работу шифратора сигнала.
3. Исследовать работу регистра для запоминания информации АЦП.
4. Исследовать работу измерителя температуры с цифровым выходом.
5. Осуществить цифровое регулирование температуры.

Аппаратура, используемая в лабораторной работе

В работе используется специализированный учебный стенд «НТЦ-09.11 Основы автоматизации», изображенный на рис. 49 (см. лабораторную работу № 6).

Для сборки исследуемых схем используются перемычки, при помощи которых производится коммутация соответствующих гнезд, выведенных на лицевую панель стенда.

Необходимые измерения производятся с помощью сигнальных светодиодов, мультиметра, осциллографа.

Выполнение работы

1. Исследование схемы блока сравнения

Сравнение кодов двух чисел осуществляют с помощью сравнивающих компараторов. На выходе компаратора появляется логическая единица, если сравниваемые двоичные числа A и B равны. Если A не равно B , то на выходе компаратора будет логический ноль. Для определения равенства двух переменных $X1$ и $X2$ используется логический элемент, состояние которого определяется в табл. 11.

Схема сравнения кодов двух двоичных чисел

X1	X2	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Такой логический элемент называется ИСКЛЮЧАЮЩИМ ИЛИ НЕ. Его реализация на логических элементах НЕ, И, ИЛИ показана на рис. 89.

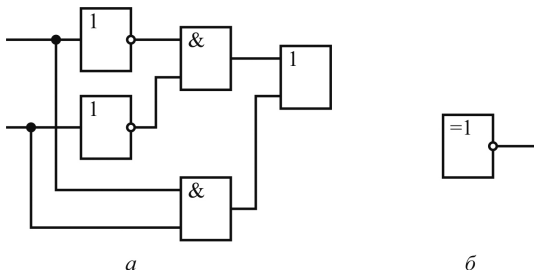


Рис. 89. Реализация логического элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ НЕ

Если сравниваемые переменные имеют несколько разрядов, то подобным образом осуществляется поразрядное сравнение и схема компаратора примет вид, приведенный на рис. 90.

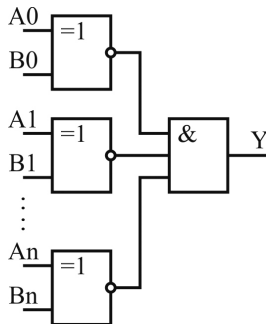


Рис. 90. Схема компаратора на несколько разрядов

Соберите и исследуйте схему сравнения, представленную на рис. 91.

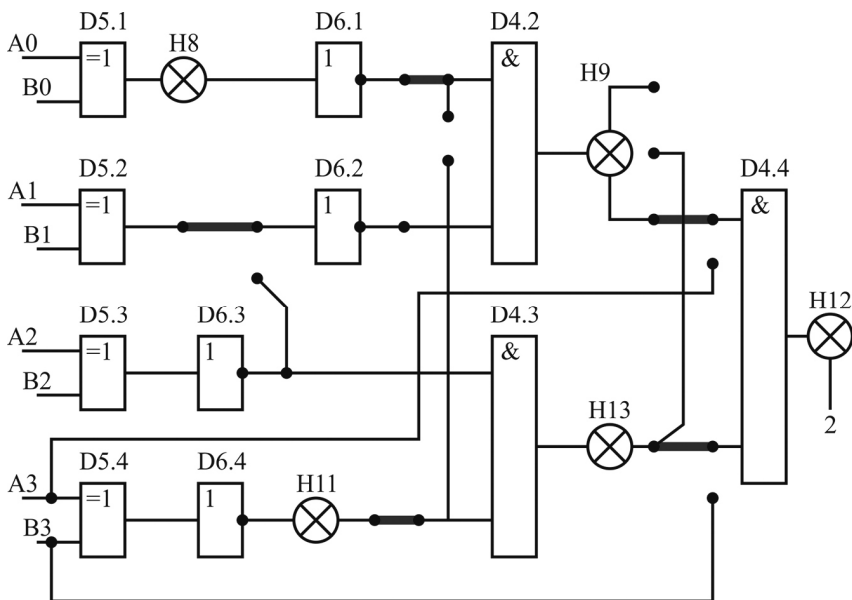


Рис. 91. Схема сравнения, исследуемая в работе

Подавая на блок схемы сравнения различные значения, составьте таблицу соответствия входных и выходных сигналов. Запишите формулу работы исследуемого блока сравнения.

2. Исследование работы шифратора сигнала

Под дискретизацией понимается преобразование непрерывных сигналов в дискретные. При этом используется дискретизация по времени и по уровню. Дискретизация по времени выполняется путем взятия отсчетов функции $U(t)$ в определенные дискретные моменты времени t_k . В результате непрерывная функция $U(t)$ заменяется совокупностью мгновенных значений

$$U_k = U(t_k).$$

Обычно моменты отсчетов выбираются на оси времени равномерно, т. е.

$$t_k = K\Delta t.$$

Дискретизация по времени лежит в основе всех видов импульсной модуляции.

Дискретизация значений функции (уровня) носит название квантования. Операция квантования сводится к тому, что вместо данного мгновенного значения сообщений $U(t)$ передаются ближайшие значения по установленной шкале дискретных уровней (рис. 92).

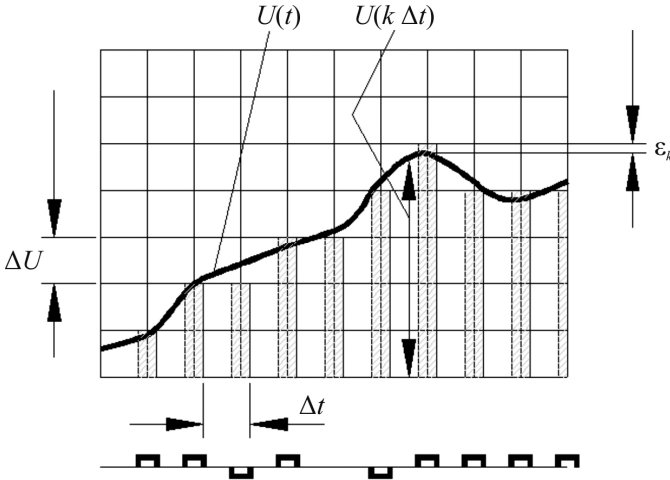


Рис. 92. Дискретизация по уровню

Дискретные значения по шкале уровней выбираются равномерно:

$$U_k = K\Delta U.$$

При квантовании вносится погрешность, т. к. истинные значения функции U заменяются округленными значениями U_k .

Погрешность $\epsilon = U - U_k$ является случайной величиной и проявляется на выходе как дополнительный шум, наложенный на передаваемый сигнал. Дискретизация одновременно по уровню и по времени позволяет непрерывное сообщение преобразовать в дискретное, которое затем может быть закодировано и передано методами дискретной техники.

Достоинствами передачи сигналов путем их дискретизации являются возможность применения кодирования для повышения

помехоустойчивости, удобства обработки сигналов и сопряжения устройств связи с цифровыми ЭВМ.

3. Исследование работы регистра для запоминания информации АЦП

Регистром памяти называется функциональный узел, предназначенный для приема, хранения, передачи и преобразования информации. В зависимости от способа приема информации регистры подразделяются на параллельные, последовательные и параллельно-последовательные. Основой построения регистров служат триггеры и логические схемы.

На рис. 93 дана схема параллельного регистра на три разряда.

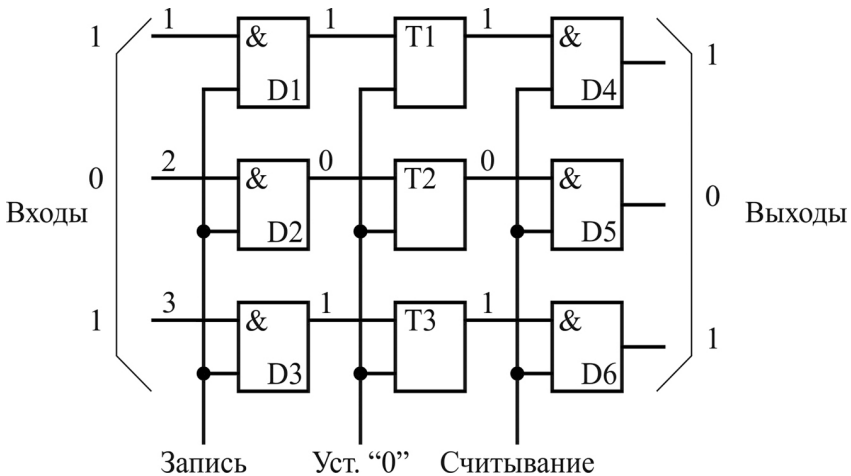


Рис. 93. Схема параллельного трехразрядного регистра

Рассмотрим принцип действия данной схемы.

Перед приемом информации все триггеры переводятся в состояние нуля подачей сигнала на вход «Уст. 0». Входная информация подается на входы элементов D1...D3 (схемы И). По сигналу «Запись» эта информация появляется на выходах элементов D1...D3 и, воздействия на установочные выходы триггеров, переводит их в соответствующее состояние. По окончании записи триггеры останутся в этом состоянии независимо от входной информации. Для выдачи информации подается импульс на вход

«Считывание». В этом случае на выходах элементов D4...D6 появятся соответствующие значения сигналов. При этом этот код сохраняется в регистре. Параллельные регистры чаще всего используются для хранения информации.

В последовательном регистре (регистре сдвига) информация вводится и выводится поразрядно. Регистр состоит из последовательно соединенных ячеек, содержание которых под действием серии тактовых импульсов перемещается от младшего разряда к старшему и наоборот. Наиболее широкое распространение получили параллельно-последовательные регистры (рис. 94).

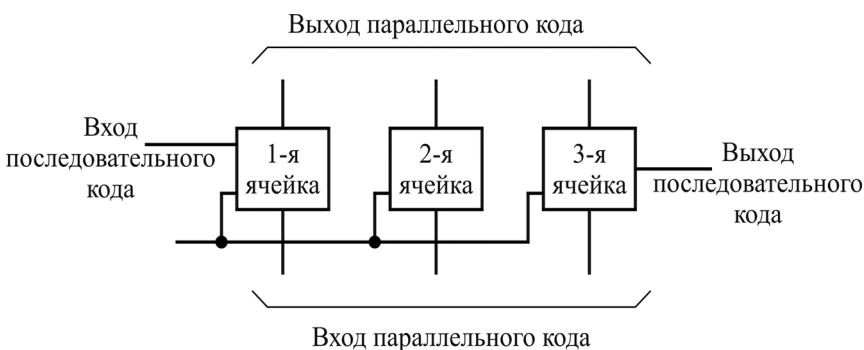


Рис. 94. Схема параллельно-последовательного регистра

В таких регистрах информация может записываться как в параллельном коде, так и в последовательном. Кроме того, эти регистры позволяют преобразовать параллельный код в последовательный и наоборот.

Изобразите в виде таблицы взаимосвязь показаний элемента индикации, кодированного двоичным кодом выходного сигнала аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и значения температуры t °С.

4. Исследование работы измерителя температуры с цифровым выходом

Соберите схему для аналогового измерения температуры на основе терморезистора и инвертирующего операционного усилителя, изображенную на рис. 95.

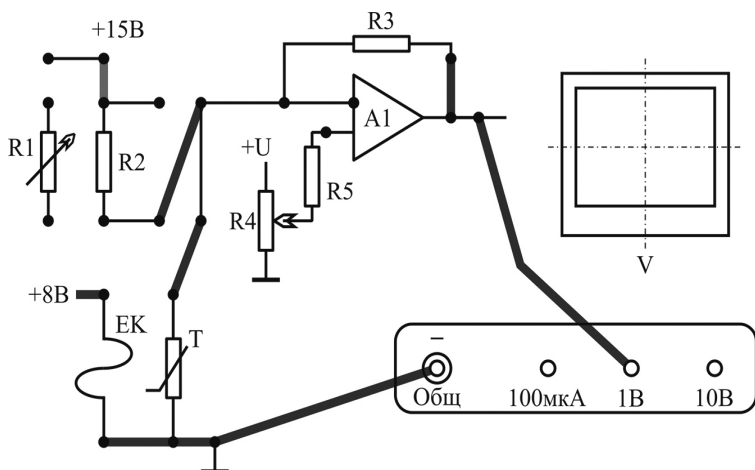


Рис. 95. Схема для аналогового измерения температуры

Определите температуру с помощью аналогового датчика температуры.

Произведите преобразование выходного сигнала датчика в цифровой сигнал, соединив выход схемы (см. рис. 95) с входом АЦП (рис. 96).

Питание +12 В к ДУ подсоедините с помощью длинных проводов.

Установите ДУ таким образом, чтобы его выходной потенциал был равен нулю. С помощью генератора одиночных импульсов ГОИ подайте управляющий импульс на АЦП и проверьте работоспособность схемы (тумблер S9 включен). Прodelайте тоже для нескольких ненулевых значений ДУ.

Вместо ГОИ на управляющий вход подайте импульсы «1с». Для этого нужно установить соответствующую перемычку и включить тумблер S9, S10. Плавно вращая ДУ и используя вольтметр для измерения входного сигнала и индикатор для фиксирования выходного кода, составьте таблицу соответствия: входной сигнал – выходной код. Запишите показания семисегментного индикатора при кодах соответствующих числам от 10 до 16. Нарисуйте диаграмму работы АЦП для одного из выходных сигналов.

Включите в разрыв между D8 и D11 регистр D13 с фильтром G1. На вход одновибратора подайте импульсы готовности данных

(вывод 16 с элемента D8). Прodelайте опыты предыдущего абзаца. Нарисуйте временные диаграммы работы.

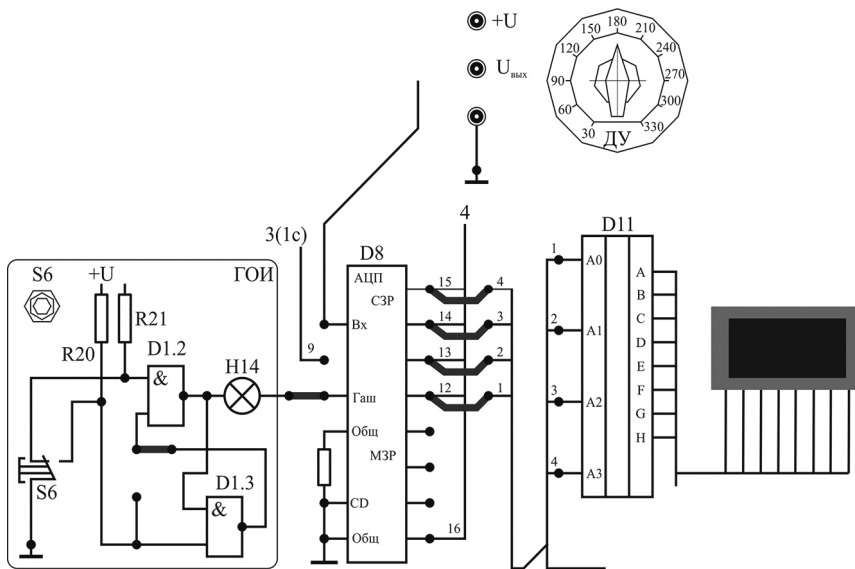


Рис. 96. Схема преобразования выходного сигнала датчика в цифровой сигнал

Представьте в виде таблицы взаимосвязь показаний элемента индикации, кодированного двоичным кодом выходного сигнала АЦП и значения температуры t °С.

5. Цифровое регулирование температуры

Для осуществления цифрового регулирования температуры необходимо замыкать и размыкать цепь тока нагрева.

Соберите схему, изображенную на рис. 97.

В качестве измерителя температуры с цифровым выходом используйте схему рис. 96.

Запоминание информации АЦП осуществляйте с помощью регистра D13.

Требуемую температуру задавайте с помощью шифратора D9 в соответствии с построенной таблицей взаимосвязи показаний элемента индикации, кодированного двоичным кодом выходного сигнала АЦП, и значений температуры t °С.

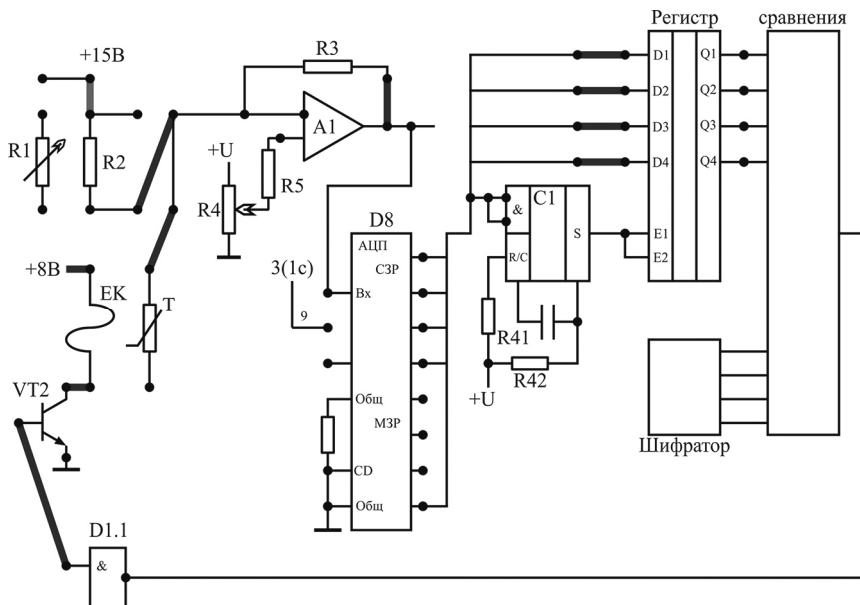


Рис. 97. Схема цифрового регулирования температуры

Сравнение кодов с выходов регистра D13 и выходов шифатора D9 осуществляют с помощью схемы блока сравнения (см. рис. 91).

Выходом схемы блока сравнения через элемент D1.1 и транзистор VT2 коммутируют цепь нагревательного элемента.

Для ускорения процессов включите нагревательный элемент EK через нормально замкнутый контакт K2.3 и тумблер S3 на Общ. А управляющий сигнал схемы управления заведите на транзистор VT2, к которому подключите катушку реле K2.

Проведите опыты по цифровому регулированию температуры. Опишите работу схемы.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Таблица соответствия входных и выходных сигналов блока сравнения и формула работы исследуемого блока сравнения.
3. Таблица соответствия: входной сигнал – выходной код АЦП.
4. Временные диаграммы работы АЦП.

5. Таблица взаимосвязи показаний элемента индикации, кодированного двоичным кодом выходного сигнала АЦП, и значения температуры t °С.

6. Описание работы схемы цифрового регулирования температуры.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение цифровых систем автоматического управления.

2. Назовите достоинства и недостатки дискретной передачи сигналов.

3. Поясните принцип действия параллельного трехразрядного регистра.

5. Поясните схему, используемую в работе.

6. Как осуществляется цифровое регулирование температуры?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Коновалов, Б. М. Теория автоматического управления : учебное пособие для студентов вузов / Б. М. Коновалов, Ю. М. Лебедев // 3-е изд., доп. и перераб. – Санкт-Петербург: Лань, 2015. – 220 с.
2. Кочетков, В. П. Основы теории управления : учебное пособие для студентов вузов / В. П. Кочетков. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2012. – 412 с.
3. Власов, К. П. Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета : учебное пособие для студентов вузов / К. П. Власов [2-е изд., испр. и доп.]. – Харьков : Гуманитарный центр, 2013. – 540 с.
4. Компьютерные технологии и микропроцессорные средства в автоматическом управлении : учебное пособие по дисциплине «Автоматическое управление» / Б. А. Карташов [и др.]; под ред. Б. А. Карташова – Ростов-на-Дону : Феникс, 2013. – 541 с.
5. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие для студентов вузов / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2011. – 464 с.
6. Сидоренко, Ю. А. Теория автоматического управления: практикум / Ю. А. Сидоренко, Е. Е. Мякинник. – Минск : БГАТУ, 2012. – 130 с.
7. Сидоренко, Ю. А. Теория автоматического управления : лабораторный практикум / Ю. А. Сидоренко, Е. Е. Мякинник. – Минск : БГАТУ, 2012. – 104 с.

Дополнительная

8. Власов, К. П. Теория автоматического управления : учебное пособие / К. П. Власов. – Харьков : Гуманитарный центр, 2007. – 528 с.: ил.
9. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления : учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. Я. Ротач. – М. : Издательство МЭИ, 2004. – 400 с., ил.
10. Сидоренко, Ю. А. Теория автоматического управления / Ю. А. Сидоренко. – Минск : БГАТУ, 2007. – 124 с.

11. Анхимюк, В. Л. Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Олейко, Н. Н. Михеев. – Минск : Дизайн ПРО, 2000 – 352 с., ил.

12. Ерофеев, А. А. Теория автоматического управления : учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А. А. Ерофеев. – СПб. : Политехника, 2003. – 302 с.: ил.

13. Теория автоматического управления : учебник / В. Н. Брюханов [и др.]; под ред. Ю. М. Соломенцева. – 4-е изд., стереотип. – М. : Высшая школа, 2003. – 272 с.: ил.

14. Дьяконов, В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб. : Питер, 2001. – 448 с.

15. Ощепков, А. Ю. Системы автоматического управления: теория, управление, моделирование в MATLAB : учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. / А. Ю. Ощепков. – СПб. : Лань, 2013. – 208 с.: ил.

16. Евсюков, В. Н. Нелинейные системы автоматического управления : учебное пособие / В. Н. Евсюков. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2007. – 172 с.

17. Олссон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Дж. Пиани. – СПб. : Невский диалект, 2001. – 557 с.

Технические нормативные правовые акты

1. Образовательный стандарт высшего образования. Высшее образование. Первая ступень. Специальность 1-53 01 01 Автоматизация технологических процессов и производств (по направлению). Квалификация инженер по автоматизации : ОСВО 1-53 01 01–2013. – Минск : Министерство образования Республики Беларусь, 2013. – 93 с.

2. Правила выполнения электрических схем : ГОСТ 2.702–75 (СТ СЭВ 1188–78) : ЕСКД. – Взамен ГОСТ 2.702–69, кроме пп. 3.23–3.37, п. 3.61 и приложения 1; введ. 01.07.1977. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 34 с.

3. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах : ГОСТ 2.710–81 (СТ СЭВ 2182–80) : ЕСКД. – Взамен ГОСТ 2.710–75; введ. 01.07.1981. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 14 с.

4. Обозначения условные графические в схемах. Элементы цифровой техники : ГОСТ 2.743–91 : ЕСКД. – Взамен ГОСТ 2.743–82; введ. 01.01.1993. – М. : Издательство стандартов, 1992. – 58 с.

5. Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники : ГОСТ 2.759–82 : ЕСКД. – Введ. 01.07.1983. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 7 с.

6. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения : ГОСТ 19.701–90 : ЕСКД. – Взамен ГОСТ 19.002–80, ГОСТ 19.003.80; введ. 01.01.1992. – М. : Изд-во стандартов, 1992. – 24 с.

7. Общие требования к организации проектирования и правила оформления дипломных и курсовых проектов (работ): учебно-методическое пособие / В. В. Гурин [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2014. – 144 с.

Интернет ресурсы

1. Официальный сайт компании MathWorks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. – Дата доступа: 9.11.2015.

2. Центр компетенций MatLab и Simulink [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.ru/>. – Дата доступа: 9.11.2015.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Матвейчук Наталья Михайловна,
Сеньков Андрей Григорьевич

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *А. Г. Сеньков*

Редактор *Д. О. Бабакова*

Корректор *Д. О. Бабакова*

Компьютерная верстка *Д. О. Бабаковой*

Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 18.12.2019. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 10,93. Уч.-изд. л. 8,54. Тираж 98 экз. Заказ 489.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/359 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.