

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-43 01 07 «Техническая
эксплуатация энергооборудования организаций»
для дневной и заочной форм обучения

Витебск
2022

УДК 62-50(075.8)

Составители:

С. А. Клименкова, А. М. Самусев, Д. В. Черненко

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО «ВГТУ», протокол № 9 от 30.05.2022.

Теплотехнические измерения и основы автоматического регулирования: лабораторный практикум / сост. С. А. Клименкова, А. М. Самусев, Д. В. Черненко. – Витебск : УО «ВГТУ», 2022. – 73 с.

В лабораторном практикуме изложены теоретические сведения и задания к лабораторным работам по дисциплине «Теплотехнические измерения и основы автоматического регулирования». Издание предназначено для студентов специальности 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» для дневной и заочной форм обучения.

УДК 62-50(075.8)

© УО «ВГТУ», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. Настройка параметров терморегуляторов	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. Изучение схем автоматического связывания нескольких объектов управления	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. Синтез циклических систем управления	11
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. Аналоговое измерение температуры и преобразование результатов измерения в цифровой сигнал	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. Определение качественных показателей линейной системы регулирования	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. Исследование автоматической системы управления моделью гидроемкости (проходной слив)	27
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7. Исследование автоматической системы управления моделью гидроемкости (сообщающиеся сосуды)	33
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8. Изучение методов настройки ПИД-регуляторов	37
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9. Исследование автоматической системы позиционного регулирования температуры теплового объекта	52
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10. Определение устойчивости систем автоматического регулирования	59
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11. Исследование параметров электромагнитных реле	64
ЛИТЕРАТУРА	72

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОРЕГУЛЯТОРОВ

Цель работы: изучение способов связи устройств, принципов настройки и опроса параметров терморегулятора ТРМ202 и ПИД-регулятора ТРМ210.

Краткие теоретические сведения

Интерфейс связи RS-485 предназначен для включения прибора в сеть, организованную по стандарту RS-485. Использование прибора в сети RS-485 позволяет осуществлять следующие функции:

1. Сбор данных об измеряемых величинах и протекании процессов регулирования в системе SCADA.

2. Установка параметров прибора с помощью программы «Конфигуратор ТРМ2хх».

3. Дистанционное управление процессом регулирования с помощью программы «Конфигуратор ТРМ2хх», работающей в среде MS Windows.

RS-485 является широко распространенным в промышленности стандартом интерфейса, обеспечивает создание сетей с количеством узлов (точек) до 256 и передачу данных на расстояние до 1200 м. При использовании повторителей количество подключенных узлов и расстояние передачи может быть увеличено. Для соединения приборов применяется экранированная витая пара проводов.

Все приборы в сети соединяются в последовательную шину (рис. 1.1). Для качественной работы приемопередатчиков и предотвращения влияния помех линия связи должна иметь на концах согласующий резистор сопротивлением $R_{\text{согл}} = 120 \text{ Ом}$, подключаемый непосредственно к клеммам прибора.

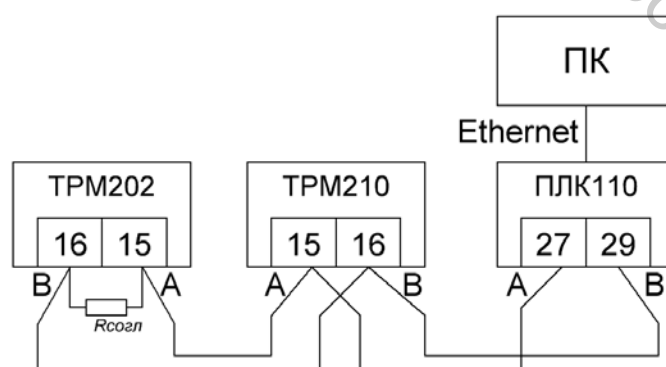


Рисунок 1.1 – Последовательность соединения приборов

Порядок выполнения работы

Конфигурирование терморегулятора ТРМ202:

1. Включите лабораторный стенд в сеть.

2. На лабораторном стенде включите тумблеры автоматов QF1 и SF1.
3. Откройте лицевую панель прибора для последующей его настройки.
4. Для перехода в режим настройки основных параметров прибора (меню **LuōP**) следует нажать кнопку  и удерживать не менее 6 секунд.
5. На верхнем экране отобразится параметр **ñEnU** (меню), а на нижнем соответственно **LuōP**.
6. При помощи кнопок перехода  и  выбрать параметр **Łōññ**. Для перехода к конфигурированию однократно нажать кнопку .
7. В параметре **Prōt** (протокол обмена данными) выбрать значение **ñrtU** (RTU). Для перехода к следующему параметру однократно нажмите кнопку .
8. В параметре **bPS** (скорость обмена данными в сети управляющих импульсов) установить значение «9.6» (9600). Для перехода к следующему параметру однократно нажмите кнопку .
9. В параметре **Addr** (базовый адрес прибора в сети, организованной по стандарту RS-485) установить значение «8». Для перехода к следующему параметру однократно нажмите кнопку .
10. В параметре **rSdL** (задержка ответа от прибора по RS-485) установить значение, равное «20». При окончании конфигурирования нажать и удерживать не менее 6 секунд кнопку .
11. Для выхода из режима конфигурирования в параметре **ñEnU** при помощи кнопок  и  выбрать значение **LuōP**. Однократно нажмите кнопку .
12. Для сохранения настроек необходимо перезапустить прибор. Для этого переключите тумблер SF1.

Конфигурирование ПИД-регулятора TPM210:

1. Включите лабораторный стенд в сеть.
2. На лабораторном стенде включите тумблеры автоматов QF1 и SF2.
3. Откройте лицевую панель прибора для последующей его настройки.
4. Для перехода в режим настройки основных параметров прибора (меню **LuōP**) следует нажать кнопку  и удерживать не менее 6 секунд.
5. На верхнем экране отобразится параметр **ñEnU** (меню), а на нижнем соответственно **LuōP**.
6. При помощи кнопок перехода  и  выбрать параметр **Łōññ**. Для перехода к конфигурированию однократно нажать кнопку .
7. В параметре **Prōt** (протокол обмена данными) выбрать значение **ñrtU** (RTU). Для перехода к следующему параметру однократно нажмите кнопку .
8. В параметре **bPS** (скорость обмена данными в сети управляющих импульсов) установить значение «9.6» (9600). Для перехода к следующему параметру однократно нажмите кнопку .

9. В параметре **Addr** (базовый адрес прибора в сети, организованной по стандарту RS-485) установить значение «12». Для перехода к следующему параметру однократно нажмите кнопку .
10. В параметре **rSdL** (задержка ответа от прибора по RS-485) установить значение, равное «20». При окончании конфигурирования нажать и удерживать не менее 6 секунд кнопку .
11. Для выхода из режима конфигурирования в параметре **нЕнИ** при помощи кнопок  и  выбрать значение **ЛУОР**. Однократно нажмите кнопку .
12. Для сохранения настроек необходимо перезапустить прибор. Для этого переключите тумблер SF2.

Контрольные вопросы

1. Виды и способы соединения приборов.
2. Способы обмена данных.
3. Принцип действия терморегулятора ТРМ202.
4. Принцип действия ПИД-регулятора ТРМ210.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ИЗУЧЕНИЕ СХЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СВЯЗЫВАНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

Цель работы: изучение средств и способов связывания нескольких асинхронных двигателей. Изучение блокировки включения-выключения по заданной последовательности многодвигательных систем

Краткие теоретические сведения

Во многих производственных комплексах (в цехах с разветвленной сетью пневмотранспорта, в сушилах периодического действия, в системах электрического управления гидроприводом и др.) возникает необходимость осуществлять направленный последовательный запуск нескольких асинхронных двигателей. Например, в цехах с большой запыленностью необходимо сначала запустить двигатели вентиляторов отсоса воздуха, затем двигатели транспортеров или конвейеров и уже в последнюю очередь – двигатели производственных механизмов. Такое управление запуском производственных механизмов (приводов) может быть выполнено с помощью релейно-контакторных схем со специальными блокировками и реле времени.

По характеру работы релейные схемы разделяют на одноктактные и многотактные.

В многотактных схемах состояние исполнительных элементов определяется не только входными сигналами, но и последовательностью их поступления, а также состоянием исполнительных элементов.

В многотактных релейных схемах исполнительные реле работают как бегуны в эстафете, т. е. предусматривается определенная последовательность работы исполнительных реле. При исследовании схем решаются две задачи:

1. Синтез схем – нахождение структуры схемы по заданным условиям работы схемы.
2. Анализ схем – определение условий работы схемы или определенных ее элементов по имеющейся структурной схеме.

При анализе схем производят преобразования, при которых число промежуточных элементов стараются выбрать минимальным, т. к. при этом надежность схемы увеличивается. Преобразование схемы является подчас сложной и самостоятельной задачей. Рассмотрим возможность блокировочных связей для обеспечения определенной последовательности работы электродвигателей или их взаимосвязи.

Блокировочные связи очень часто используются в схемах путевого управления электродвигателями. В качестве блокировочных связей часто используют конечные выключатели, технологические контакты и др.

Принцип пути здесь означает, что какой-нибудь узел электрической схемы управления электродвигателями работает в зависимости от положения в пространстве органов машин и механизмов (стола, суппорты, головки станков и т.п.). Эти узлы выполняют часто такие задачи, как подача первоначальных команд на пуск или остановку двигателей только в определенной области перемещений, изменение режимов работы (в т.ч. скорости вращения двигателя) и др.

Пример построения последовательности вкл. 1-2-3, выкл. 3-2-1.

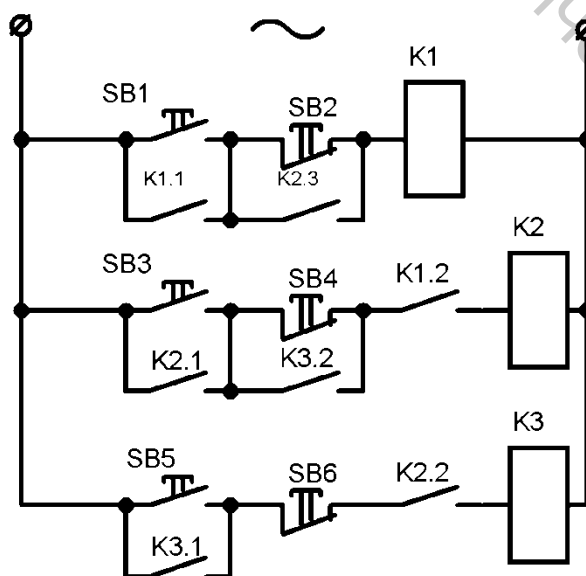


Рисунок 2.1 – Схема на релейно-контактных элементах

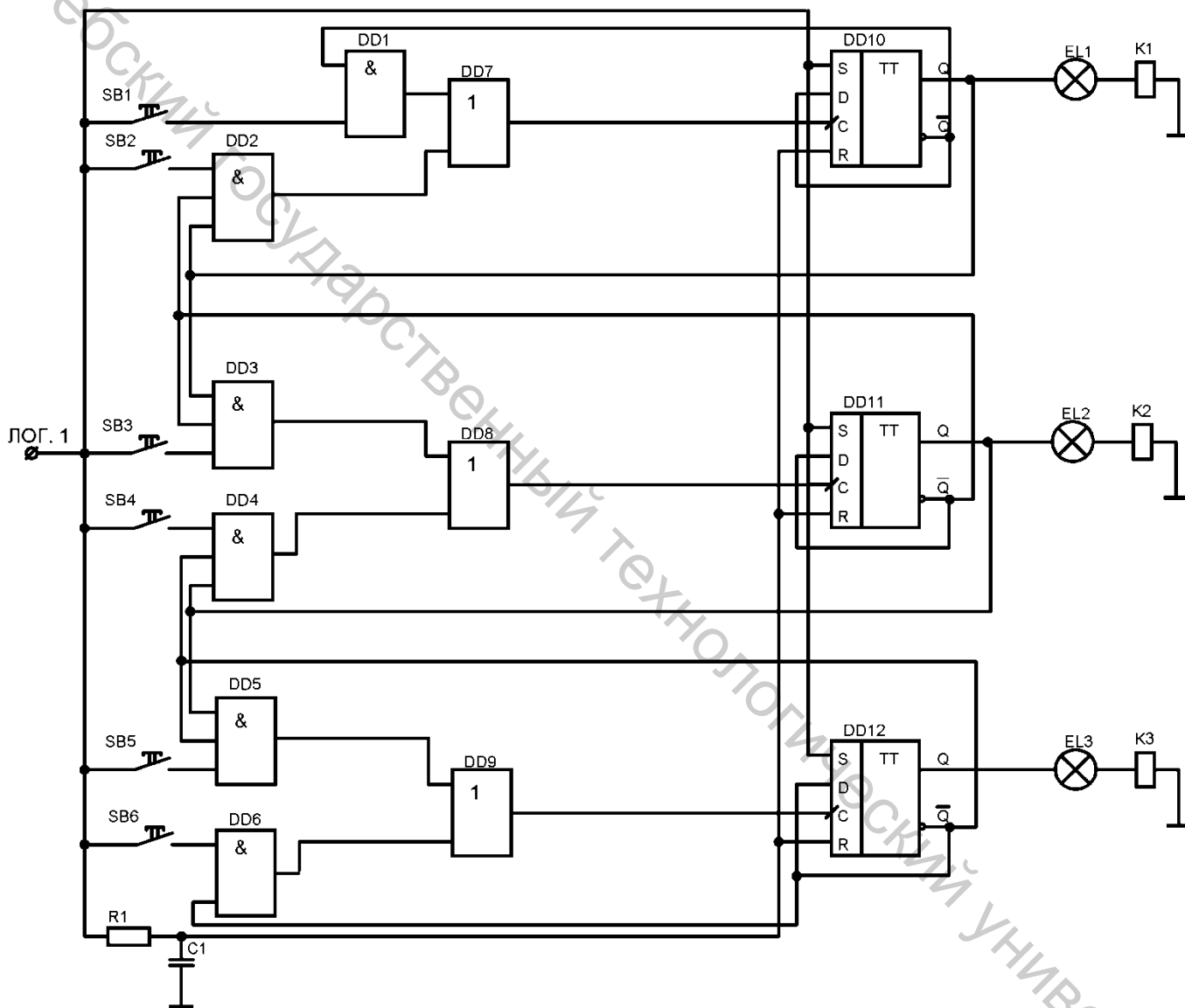


Рисунок 2.2 – Схема на логических элементах

Описание работы схем (порядок включения 1-2-3, порядок выключения 3-2-1):

1. На рисунке 2.1 изображена схема на релейно-контактных элементах. Кнопки SB1, SB3, SB5 предназначены для пуска, соответственно 1-го, 2-го и 3-его двигателей.

Кнопки SB2, SB4, SB6 – для останова 1-го, 2-го и 3-его двигателей.

В начальный момент времени все двигатели выключены, т.е. не подается питание на катушки реле K1, K2, K3.

При нажатии пусковых кнопок возможно включение только K1, т.к. включение K2 заблокировано нормально разомкнутой контактной группой K1.2, а K3 – K2.2. Это позволяет организовать последовательность включения – сначала можно включить K1, после этого K2 и затем K3.

Контактные группы K1.1, K2.1, K3.1 шунтируют кнопки пуск при подключении к питанию соответствующей катушки реле.

При отключении кнопки стоп SB2, SB4 шунтированы K3.2, K2.3. Это позволяет реализовать последовательность выключения – сначала можно выключить только K3, после этого K2 и только затем K1.

2. На рисунке 2.2 изображена схема на логических элементах.

Элементами, выполняющими включение-отключение K1-K3, являются D-триггеры DD10-DD12. Управление производится по прямому выходу D-триггера.

Состояния триггера приведены в таблице 2.1 (за прототип взят триггер TM2).

Таблица 2.1 – Состояния триггера

Режим работы	Входы				Выходы	
	$\bar{S}$	$\bar{R}$	D	C	Q	$\bar{Q}$
Асинхронная установка	0	1	×	×	1	0
Асинхронный сброс	1	0	×	×	0	1
Неопределенность	0	0	×	×	1	1
Загрузка «1» (установка)	1	1	1	↑	1	0
Загрузка «0» (сброс)	1	1	0	↑	0	1

Интегрирующая цепь R1-C1 используется для начальной установки триггеров в момент включения питания. В начальный момент на вход $\bar{S}$ подается «лог.1», а на вход $\bar{R}$ «лог.0», т.к. в начальный момент RC-цепь формирует задержку (рис. 2.2). Задержка происходит из-за того, что в начальный момент времени, при включении питания, напряжение на конденсаторе равно 0 (законы коммутации). В дальнейшем на входе $\bar{R}$ установлена «лог.1».

Блокировка, запрещающая включение и выключение К1-К3 не в соответствии с заданной последовательностью, реализована на логических элементах DD1-DD9.

Кнопки SB1, SB3, SB5 предназначены для пуска, соответственно, 1-го, 2-го и 3-его двигателей.

Кнопки SB2, SB4, SB6 – для останова 1-го, 2-го и 3-его двигателей.

Порядок выполнения работы

Разработать схему управления многодвигательной системой приводов конвейерного транспорта в двух исполнениях:

- с использованием слаботочных реле;
- с использованием логических элементов.

В качестве задающего сигнала использовать кнопочные станции без фиксации. Изобразить разработанные схемы с обозначением элементов по правилам изображения принципиальных электрических схем таблицы 2.2.

Таблица 2.2 – Обозначение элементов на принципиальных электрических схемах

Вариант	Последовательность включения	Последовательность выключения	Тип триггеров
0	1-2-3	1-2-3	D
1	1-2-3	1-3-2	JK
2	1-2-3	3-1-2	RS
3	3-2-1	1-2-3	D
4	3-2-1	1-3-2	JK
5	3-2-1	3-1-2	RS
6	3-1-2	1-2-3	D
7	1-3-2	3-1-2	JK
8	3-1-2	1-2-3	RS
9	1-3-2	3-1-2	D
10	1-2-3	1-2-3	RS

Контрольные вопросы

1. Описание работы схемы исходной и измененной.
2. Что такое электромагнитное реле, каков принцип его действия?
3. В чем отличие электромагнитного реле от магнитных пускателей, контакторов?
4. Назвать и дать краткую характеристику принципов управления многодвигательными системами.
5. Виды реле, их назначение.
6. Основные параметры реле и принцип работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. СИНТЕЗ ЦИКЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Цель работы: изучение метода синтеза логических последовательностей по тактограмме, реализации логических функций на релейных элементах, логическом контроллере и экспериментальная проверка схемы управления.

Краткие теоретические сведения

Автоматизированные и автоматические системы управления агрегатами и технологическими процессами, построенные на основе управляющих логических устройств, называют системами логического типа. Действие автоматических устройств логического типа можно описать функциональными зависимостями между входными и выходными сигналами, т.е. логическими последовательностями. К таким системам управления относят ЦСПУ-цикловые системы программного управления. Функциональная задача такой системы управления сводится к обработке программно-заданного цикла работы основных и вспомогательных узлов станка на основе информации о величине, направлениях и скорости перемещений, задаваемых программой обработки изделия и датчиками, входящими в состав электрооборудования станка.

Реализация функций управления узлами и механизмами станка на основе заданного цикла и информационных сигналов осуществляется в блоке электроавтоматики, в котором предусматривается возможность реализации «самопитания», «памяти» и размножения сигналов.

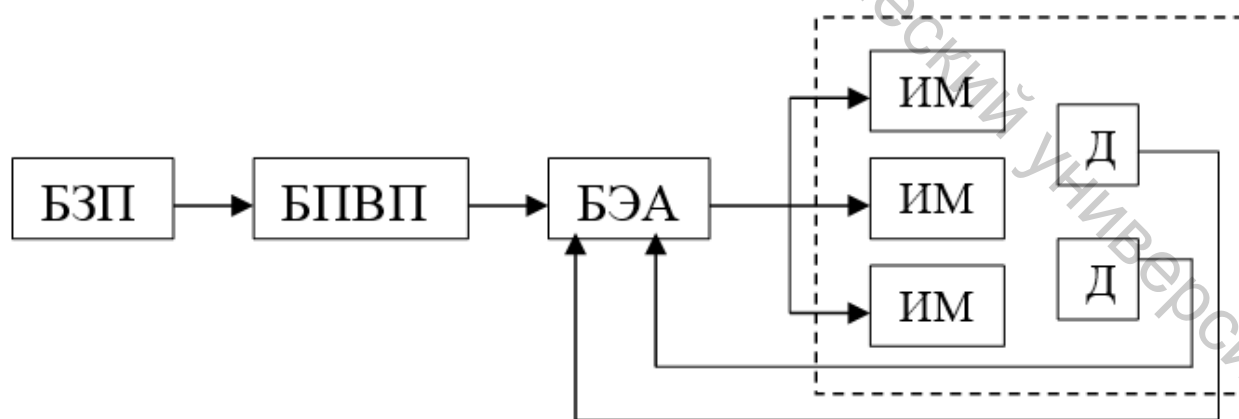


Рисунок 3.1 – Структурная схема синтеза циклических систем управления:
БЗП – блок задания программы, БПВП – блок поэтапного ввода программы,
БЭА – блок электроавтоматики, ИМ – исполнительные механизмы,
Д – датчик

В течение многих лет для построения блоков электроавтоматики использовали релейно-контактные элементы, имеющие невысокую надежность, малое быстродействие, являющиеся сложными в обслуживании и наладке. В настоящий момент элементной базой БЭА являются интегральные схемы (ИС) малой и большой степени интеграции (БИС) и дискретные полупроводниковые элементы, способные реализовать логические функции любой сложности.

На рисунке 3.1 представлена структурная схема синтеза циклических систем управления. Где на вход БЭА поступает набор сигналов с БПВП и датчиков положения, скорости, ускорения и т.п.

На выходе БЭА формируются сигналы, которые по соответствующим каналам управляют исполнительными механизмами.

Основной задачей синтеза ЦСПУ является разработка структур БЭА, составление логических выражений для срабатывания каждого исполнительного механизма и на их основе системы управления, обеспечивающей заданную программу работы исполнительных механизмов. Достаточно широко разработаны методы синтеза логических выражений по таблицам состояния, циклограммам, графам, тактограммам.

Тактограммо-графическое изображение работы исполнительных механизмов, такт – промежуток времени, в течение которого ни один механизм не меняет свое состояние. Движение (работа) исполнительного механизма обозначается на тактограмме наклонной линией, высота – горизонтальной. Для составления логических функций срабатывания механизмов входным сигналам (получаемым с датчиков положения) присваивают «веса». Вес n -го сигнала равен 2^n . Введение «весов» позволяет различать входные наборы. Если суммарные «веса» в начале такта одинаковые, то одинаковые и входные наборы. При одинаковых входных наборах в различных тактах необходимо вводить дополнительный сигнал с элементами «памяти». «Память» включают таким образом, чтобы такты с одинаковыми весами имели разный уровень «памяти» (Z и $\bar{Z}$). При реализации схемы на релейно-контактной аппаратуре необходимо запомнить и импульсные сигналы (с нулевой длительностью).

Принцип работы лабораторной установки представлен на рисунке 3.2.

Исполнительный механизм М1 перемещает инструменты в горизонтальном направлении от одного микропереключателя ДП1 до другого ДП2. Механизм М2 поворачивает рабочий стол на угол 180° , который фиксируется бесконтактными датчиками положения ДП3 – ДП4.

Тактограмма работы этих механизмов представлена в таблице 3.1. На ней введены: столбец с весами сигналов и строки с суммарным весом сигналов в начале тактов и входными сигналами. Входным считается сигнал, появляющийся в начале такта или в конце предыдущего. Из тактограммы видно, что сигнал x_0 является импульсным, а в I и III тактах одинаковые суммарные веса, т.е. необходимо вводить «память». Введем два элемента «памяти», один включим в начале I такта и в начале II выключим. Это

позволит запомнить импульсный сигнал x_0 и разделить входные одинаковые наборы. Второй элемент «памяти» введен для разделения повторяющихся трех элементов цикла – для поворота стола на 360° .

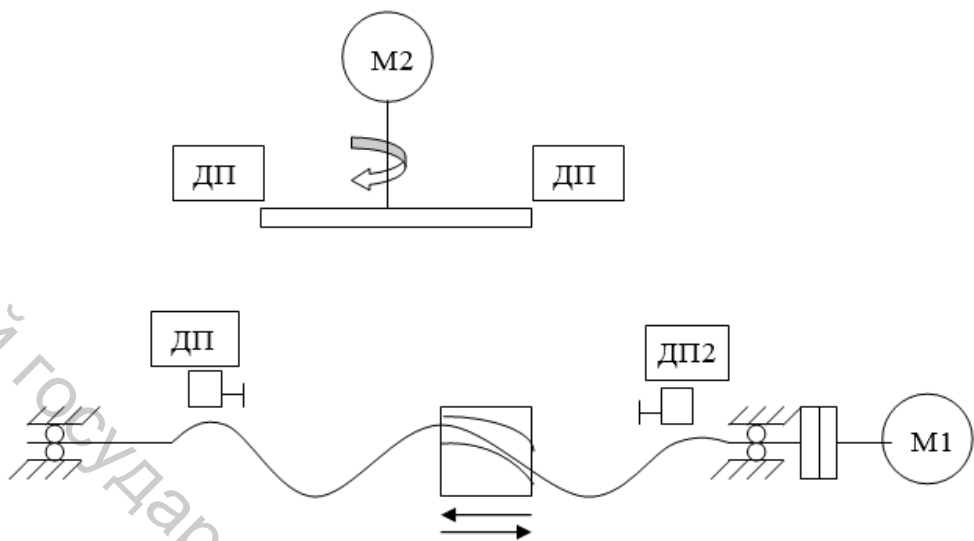


Рисунок 3.2 – Упрощенная схема лабораторной установки

Таблица 3.1 – Тактограмма работы механизмов

№ п/п	Мех-м	Такт	I	II	III	Сигнал
1	M1					x_0 1
2	M2					x_2 4 x_3 8
3	Σвес		10	9	10	
4	Входные сигналы		$x_2(2)$	$x_0(0)$	$x_1(1)$	
5	Z1					
6	Z2					
7	M1↑		$x_2 \cdot z_1$			
8	M1↓					
9	M2				$x_1 \cdot z_2$	
10	Z1		x_2	x_0		

11	Z2			x_1	x_2
----	----	--	--	-------	-------

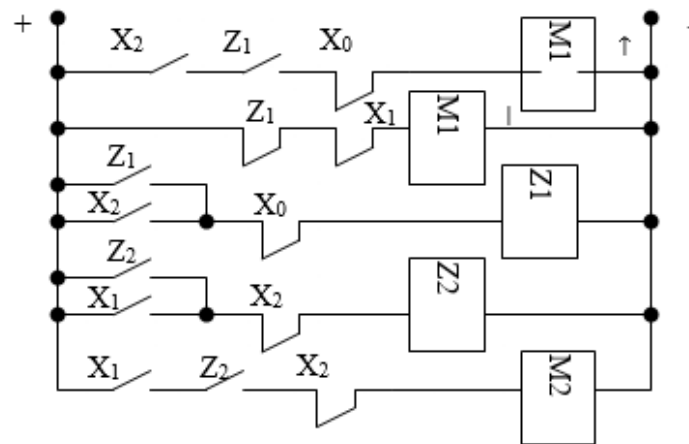


Рисунок 3.3 – Схема функций управления двигателем:

x_0 – сигнал с ДП1, x_1 – сигнал с ДП2,

x_2, x_3 – сигналы с ДП3 – ДП4

Правила записи функций срабатывания механизмов по тактограмме.

1. Введем строки, в которых будем записывать функции включения механизмов (9, 7, 8) и памяти (10, 11).

2. В формулу функции включения механизма рассматриваемого такта записывается входной сигнал и должно выполняться соотношение

$$T(x_i) \in T(M_j).$$

3. Если указанное соотношение не наблюдается, то формулу включения дополняют сигналами памяти так, чтобы выполнялось соотношение

$T(x_i \cdot y_1 \cdot y_2 \cdot \dots) \in T(M_j)$, т.е. надо выбрать минимальное произведение таких сигналов, которые бы в других тактах не встречались. Этими же правилами пользуются для записи логической формулы включения элемента памяти.

4. Функции срабатывания механизмов записываются в следующем виде $F(M_i) = f(M_i) \cdot \overline{x_j}$, где x_j – сигнал с датчика положения, ограничивающего перемещение в этом направлении, $f(M_i)$ – функция включения механизма в такте.

5. Для элемента памяти функция срабатывания записывается так:

$F(z) = [f(z) + z] \cdot \overline{f(\overline{z})}$, где $f(z)$ – функция включения памяти, $f(\overline{z})$ – функция выключения памяти.

В соответствии с этими правилами в строки 7, 8, 9, 10, 11 записываем наборы сигналов для включения механизмов и элементов памяти.

На основании этих наборов запишем функции срабатывания механизмов и элементов памяти: $F(M_1 \uparrow) = x_2 \cdot z_1 \cdot \overline{x_0}$; $F(M_1 \downarrow) = \overline{z_1} \cdot x_1$
 $F(M_2 \downarrow) = x_1 \cdot z_2 \cdot \overline{x_2}$; $F(z_1) = (x_2 + z_1) \cdot \overline{x_0}$ $F(z_2) = (x_1 + z_2) \cdot \overline{x_2}$.

В соответствии с полученными логическими выражениями составим релейно-контактную схему. Так как сигналы с датчиков используются в схеме по несколько раз, их необходимо размножить через промежуточные реле. В схему необходимо ввести блокировки для защиты от короткого замыкания в схеме реверса механизма МІ, устройства сигнализации и кнопочное управление. Бесконтактные датчики ДПЗ-ДП4 питаются от источника постоянного тока, поэтому часть схемы собрана на аппаратуре постоянного тока, а часть – на аппаратах переменного тока – схема реверса для механизма МІ.

Схема управления, собранная в соответствии с полученными логическими выражениями и имеющейся аппаратурой, представлена на рисунке 3.3.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и собрать схему (рис. 3.4).
2. Включить источник постоянного тока (18В), проверить работу бесконтактных выключателей.
3. Подать питание в схему и проверить выполнение цикла, данного тактограммой.
4. Записать логические выражения срабатывания механизмов для заданной преподавателем тактограммы.

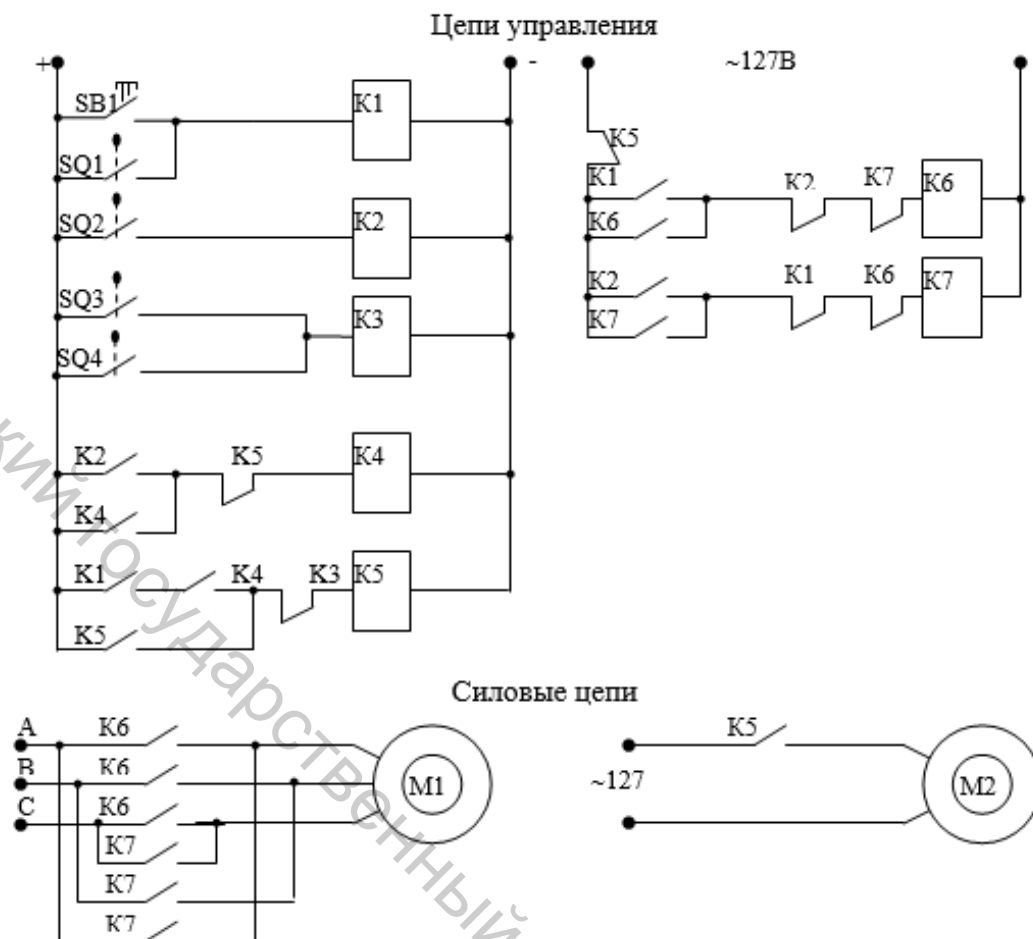


Рисунок 3.4 – Схема управления лабораторной установкой

В схеме SQ1 и SQ2 – бесконтактные датчики линейного перемещения. SB1 – кнопка «Пуск». SQ3 и SQ4 датчики угла поворота.

Контрольные вопросы

1. Описание работы схемы исходной и измененной.
2. Область применения ЦСПУ.
3. Виды датчиков положения исполнительных механизмов, принцип действия.
4. Назвать и дать краткую характеристику принципов управления многодвигательными системами.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. АНАЛОГОВОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ В ЦИФРОВОЙ СИГНАЛ

Цель работы: изучить методы измерения аналоговых сигналов при помощи операционных усилителей. Изучить методы преобразования аналогового сигнала в цифровой сигнал.

Краткие теоретические сведения

Основной функцией датчика является преобразование входной величины любой физической природы в величину на выходе, более удобную для контроля, регулирования или управления.

Непосредственно использовать входной сигнал датчика для воздействия на последующие элементы автоматической системы не всегда возможно.

Преобразование выходной величины датчика в удобный для последующего использования и измерения вид осуществляется в измерительных схемах. Входной величиной измерительной схемы являются переменное сопротивление или напряжение.

Из большого разнообразия измерительных схем наиболее широко используются мостовые, дифференциальные и компенсационные.

Мостовые схемы применяют преимущественно совместно с датчиками, работа которых основана на изменении сопротивления.

Дифференциальные схемы применяют при необходимости сравнения двух величин или когда необходимо исключить синфазную составляющую в измеренном сигнале.

Компенсационные схемы используются при измерении малых ЭДС.

С развитием интегральной схемотехники все большее распространение получают измерительные схемы на основе ОУ. Этому соответствуют такие его качественные характеристики, как: возможность обеспечения постоянного коэффициента усиления; большой коэффициент подавления синфазного сигнала; малые смещения и дрейфы входных и выходных сигналов, малые выходные сопротивления и большое (10^6 – 10^8) выходное сопротивление.

Большинство физико-технических величин являются по своим свойствам аналоговыми величинами. Они определяются и представляются в форме, пригодной для соответствующей обработки сигнала с помощью аналоговых измерительных устройств.

Дискретизация и кодирование непрерывных сигналов. 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:

$$U_k = U(t_k). \quad (4.1)$$

Обычно моменты отсчетов выбираются на оси времени равномерно, т.е.

$$t_k = K\Delta t. \quad (4.2)$$

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. 3.1).

Дискретные значения по шкале уровней выбираются равномерно:

$$U_k = K\Delta U. \quad (4.3)$$

При квантовании вносится погрешность, т.к. истинные значения функции U заменяются округленными значениями U_k .

Погрешность $\varepsilon = U - U_k$ 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.

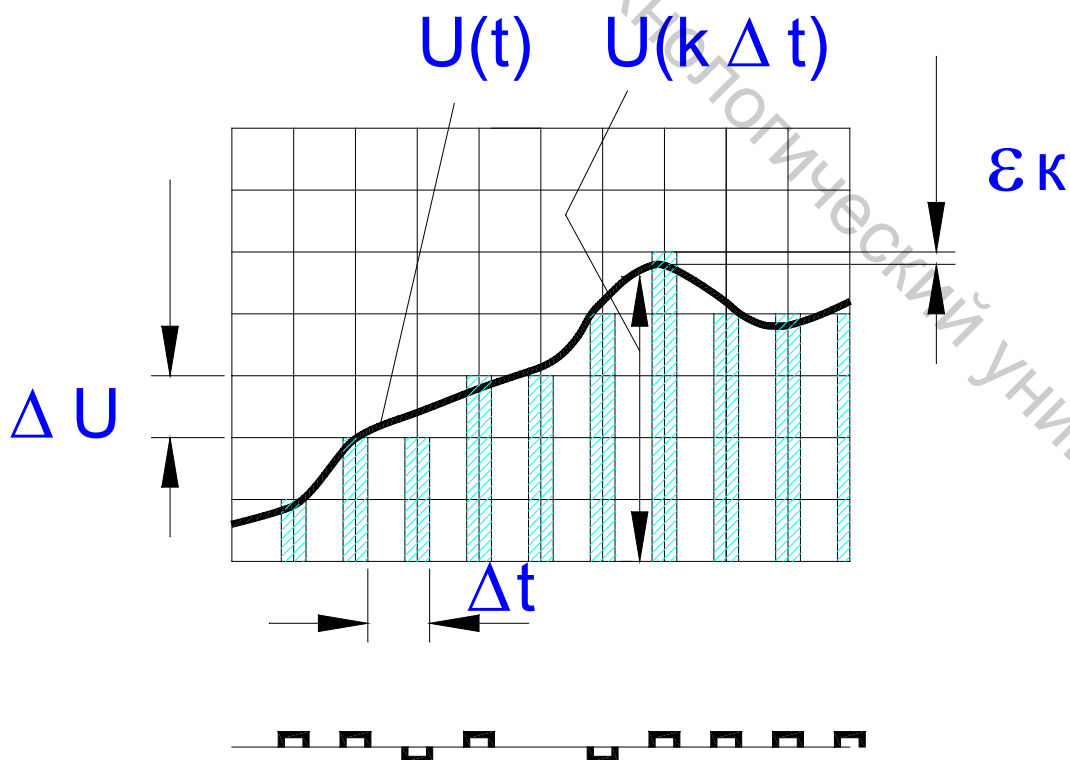


Рисунок 4.1 – Квантование аналогового сигнала

Достоинствами передачи сигналов путем дискретизации являются возможность применения кодирования для повышения помехоустойчивости, удобства обработки сигналов и сопряжения устройств связи с цифровыми ЭВМ.

Витебский государственный технологический университет

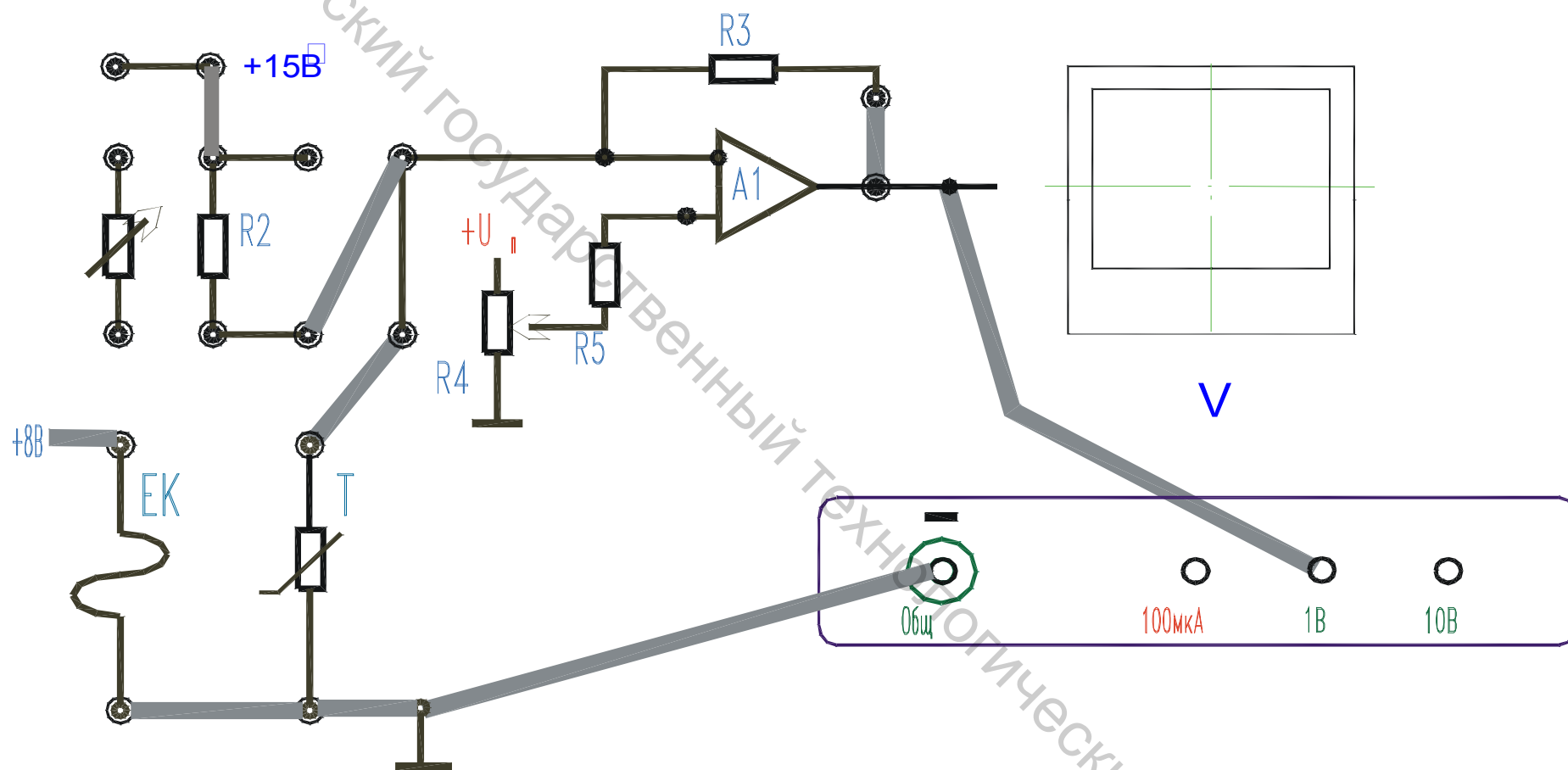


Рисунок 4.2 – Схема измерения температуры

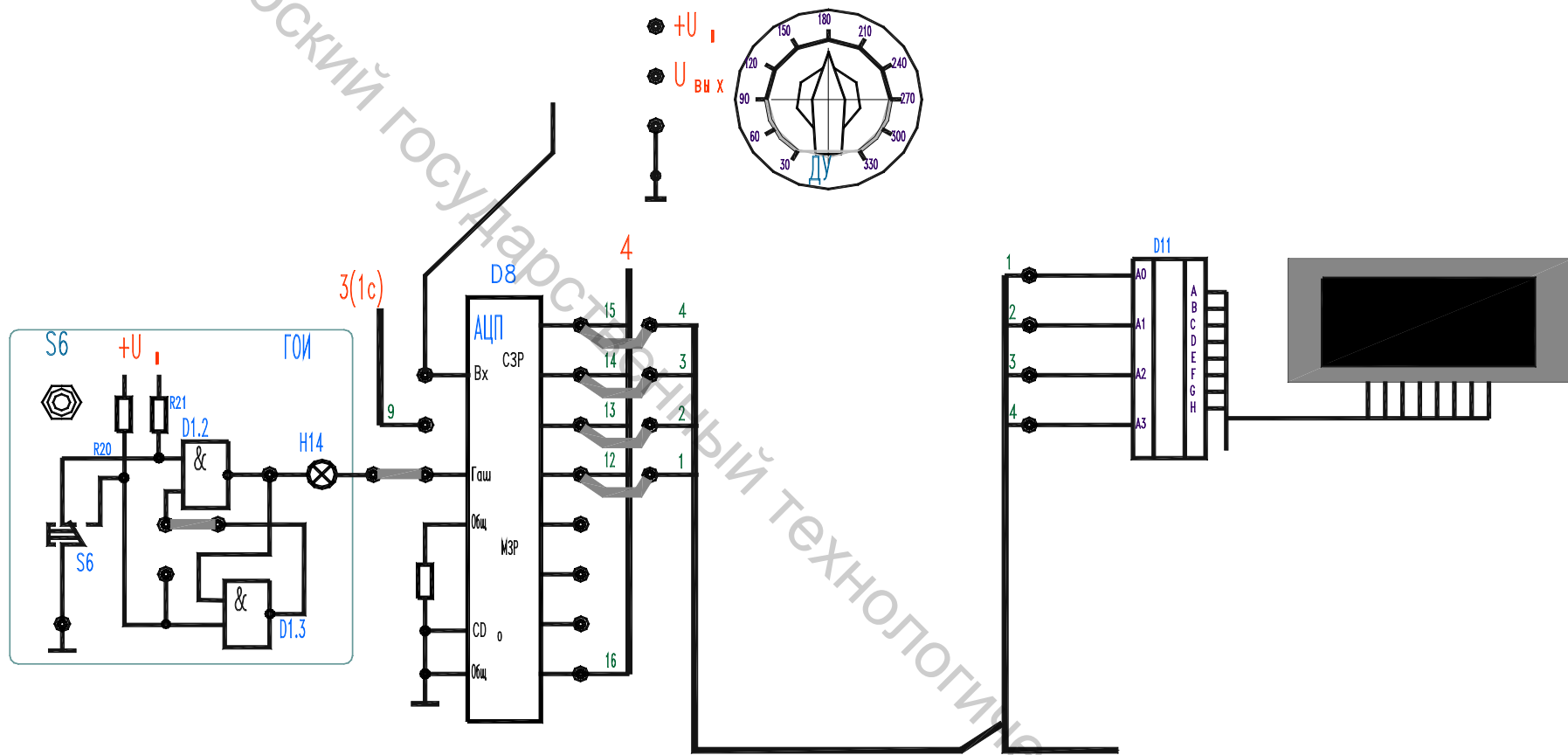


Рисунок 4.3 – Схема аналого-цифрового преобразователя (АЦП)

Порядок выполнения работы

1. Разработайте и соберите схему для аналогового измерения температуры на основе терморезистора и инвертирующего операционного усилителя (рис. 4.2).

2. Сравните носители информации и информационные параметры, а также вид сигналов, поступающих от измерительных устройств. Отобразите результаты проделанной работы в соответствующей таблице.

3. Произведите преобразование выходного сигнала датчика в цифровой сигнал, соединив выход схемы (рис. 4.2) с входом АЦП (рис. 4.3).

4. Представьте в виде таблицы (табл. 4.1) взаимосвязь показаний элемента индикации, кодированного двоичным кодом выходного сигнала АЦП, и значения температуры t °C.

Таблица 4.1 – Взаимосвязь показаний элемента индикации и температуры

№ п/п	U, В	t, °C	n
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Контрольные вопросы

1. Первичные преобразователи температуры.
2. Виды измерительных схем.
3. Дискретизация по времени.
4. Дискретизация по уровню.
5. АЦП, назначение и принцип действия.
6. Пояснить работу схем.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель работы: ознакомление с устройством и принципом действия импульсного регулятора с ПИД законом регулирования. Определение показателей качества по графику переходного процесса.

Краткие теоретические сведения

Основным блоком конструкции прессов, широко распространенных в легкой промышленности и предназначенных для выполнения операций вулканизации, формования, влажно-тепловой обработки, дублирования и т.п., является плита с электронагревательными элементами. Эти пресса являются тепловыми объектами, для обеспечения температурных режимов которых используют различного рода регуляторы. Регулятор и объект образуют систему регулирования. Задача системы регулирования для большинства указанных технологических операций сводится к стабилизации температуры или изменению ее по определенному закону.

Система автоматического регулирования (САР) называется *линейной*, если все ее элементы в динамике описываются линейными уравнениями. Линейные регуляторы, в зависимости от законов регулирования, делят на пять типов:

- пропорциональный П-регулятор;
- интегральный И-регулятор;
- пропорционально-интегро-дифференциальный ПИД-регулятор;
- пропорционально-дифференциальный ПД-регулятор;
- пропорционально-интегральный ПИ-регулятор.

Законом регулирования называют функциональную связь между управляющим воздействием регулятора (его выходным сигналом) и отклонением регулируемого параметра от заданного значения (его входным сигналом).

$$U(t) = F[\Delta(t)], \quad \Delta(t) = g(t) - Y(t), \quad (5.1)$$

где $g(t)$ – заданное значение,

$Y(t)$ – текущее значение на выходе объекта управления (ОУ).

Правая часть уравнения может содержать не только отклонение $\Delta(t)$, но и его производные и интегралы. Введение производных и интегралов в закон регулирования позволяет изменять свойства САР: устойчивость, точность, качество переходного процесса.

Простейшим является (пропорциональный) *П-регулятор*, уравнение которого

$$U(t) = K_p \Delta(t), \quad (5.2)$$

а передаточная функция

$$W(p) = K_p. \quad (5.3)$$

П-регулятор является простейшим линейным статическим регулятором. Статические регуляторы не могут полностью ликвидировать отклонение параметра от заданного значения, т.е. они дают остаточную (статическую) ошибку. Регулирующий орган в системе с П-регулятором неподвижен не только при ошибке, равной нулю $\Delta(t)=0$, но и при постоянной величине ошибки $\Delta(t)=const$.

Статическим является и *ПД-регулятор*, закон регулирования которого записывается следующим образом

$$U(t) = K\Delta t + \frac{T_{np} d\Delta t}{dt}, \quad (5.4)$$

где T_{np} – время предварения.

Передаточная функция ПД-регулятора

$$W(p) = K(1 + T_{np}p), \quad (5.5)$$

где K – параметр настройки.

ПД-регулятор называют регулятором с предварением, т.к. он реагирует на величину отклонения и скорость его изменения, т.е. регулирующий орган начинает перемещаться при изменении скорости отклонения, что увеличивает быстродействие регулятора.

Статической ошибки удастся избежать, если включить в закон регулирования интегральную составляющую или использовать *И-регулятор*. Закон регулирования И-регулятора

$$U(t) = \frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta(t) dt, \quad (5.6)$$

а передаточная функция

$$W(p) = \frac{1}{T_u p}, \quad (5.7)$$

где T_u – время интегрирования – параметр настройки.

Переходный процесс в системе с И-регулятором носит медленно затухающий колебательный характер и снижает устойчивость САР. Регулирующий орган в такой системе неподвижен только при равенстве заданного и измеренного значения параметра, т.е. при отсутствии ошибки.

ПИ-регулятор – пропорционально-интегральный. Закон регулирования

$$U(t) = K[\Delta(t)] + \frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta(t) dt \quad (5.8)$$

и передаточная функция

$$W(p) = \frac{K_p (1 + T_u p)}{T_u p}, \quad (5.9)$$

где K_p – параметр настройки.

ПИ-регулятор совмещает в себе положительные свойства обоих регуляторов, т.е. является астатическим и обладает достаточным быстродействием. При появлении отклонения регулируемой величины от заданного значения такой регулятор вначале ведет себя как П-регулятор, т.е. быстро вырабатывает управляющее воздействие на ликвидацию отклонения, затем вступает в действие интегральная составляющая, сводящая ошибку к нулю.

Лучшими свойствами обладает ПИД-регулятор, закон регулирования которого

$$U(t) = K[\Delta(t)] + \frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta(t) dt + T_{np} \frac{d\Delta(t)}{dt}, \quad (5.10)$$

а передаточная функция

$$W(p) = \frac{(T_{np} T_u p^2 + T_u p + 1) K}{T_u p}. \quad (5.11)$$

Такой регулятор сочетает в себе положительные свойства всех более простых регуляторов, обладает высоким быстродействием, не дает остаточной ошибки, колебательный переходный процесс быстро затухает.

Система регулирования считается работоспособной, если переходный процесс в ней затухает, т.е. система является устойчивой. Однако устойчивость – недостаточный критерий оценки качества системы регулирования.

Помимо устойчивости системы к возмущениям, необходимо, чтобы переходные процессы, возникающие в автоматической системе благодаря наличию разного рода возмущающих и управляющих воздействий, удовлетворяли определенным требованиям. Требования к качеству переходного процесса в автоматической системе регулирования для различных систем различны.

Для оценки качества переходного процесса при регулировании используют прямые и косвенные методы. Прямые методы предполагают наличие, полученное тем или иным способом, графика переходного процесса. В действующих САР график изменения регулируемой величины во

времени может быть получен экспериментально. Если известно дифференциальное уравнение системы, то по его решению также может быть построен график переходного процесса.

Качество переходного процесса оценивают следующими показателями:

1. Перерегулирование.

Перерегулирование характеризует максимальное динамическое отклонение регулируемой величины от установившегося значения $Y_{уст.}$ (рис. 9.1). Обычно перерегулирование выражают в процентах от значения $Y_{уст.}$. Абсолютная величина ΔY_{max} определяется по графику переходного процесса:

$$\Delta Y_{max} = Y_{max} - Y_{уст.} \quad (5.12)$$

Соответственно перерегулирование будет определяться выражением

$$\sigma = \frac{\Delta Y_{max}}{Y_{уст.}} 100\%. \quad (5.13)$$

2. Время регулирования.

Время регулирования характеризует быстродействие САР и представляет собой время t_p , отсчитываемое от начала переходного процесса, по истечении которого отклонение регулируемой величины от нового установившегося значения делается меньше и будет оставаться меньше определенной заранее заданной величины Δ . Обычно принимается $\Delta = (0,01 - 0,05)$. Таким образом, переходный процесс в системе считается закончившимся, когда регулируемая величина начинает отличаться от своего установившегося значения не более чем на 1...5%. Чем меньше величина t_p , тем выше быстродействие системы.

3. Степень затухания.

Степень затухания характеризует колебательный переходный процесс при регулировании. Степень затухания определяют по формуле

$$\psi = \frac{\Delta Y_{max} - \Delta Y_2}{\Delta Y_{max}}. \quad (5.14)$$

Для устойчивой САР $0 < \psi \leq 1$, чем ближе ψ к единице, тем быстрее затухает переходный процесс, следовательно, тем больше запас устойчивости. Например, при $\psi = 0,9$ каждая последующая амплитуда колебаний меньше предыдущей в 10 раз.

Колебательный переходный процесс можно оценивать и числом колебаний за время регулирования.

Обычно считают, что число колебаний не должно быть больше двух или трех.

4. Остаточная (статическая) ошибка.

Остаточная (статическая) ошибка – характеризует точность системы и определяет отклонение регулируемого параметра от нового установившегося значения после завершения переходного процесса. Статическая ошибка возникает в системах со статическим регулятором.

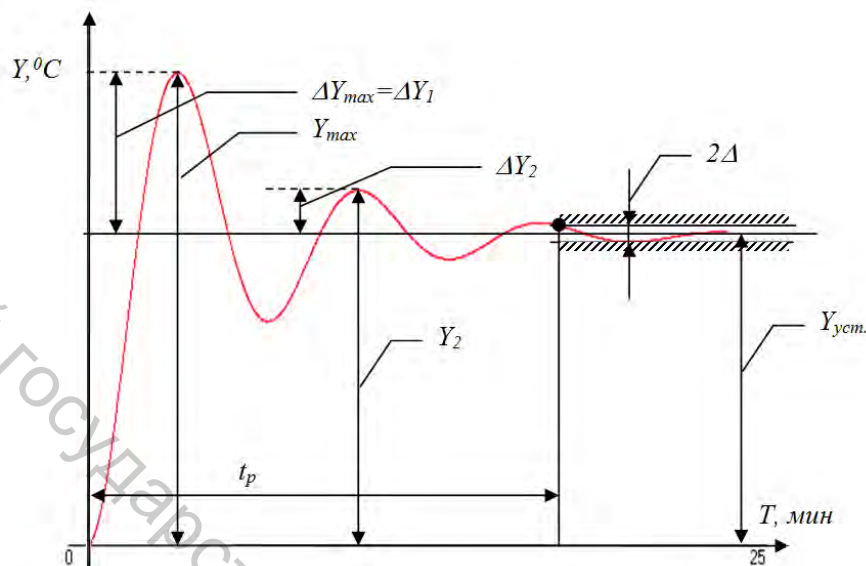


Рисунок 5.1 – График переходного процесса

При выборе типа регулятора и параметров его настройки учитывают свойства объекта и ограничения на качественные показатели.

Порядок выполнения работы

1. Смоделировать с использованием ЭВМ (программа Sam Sim) Систему автоматического регулирования (управления) с использованием ПИД-регулятора и промышленным объектом (рис. 5.2).

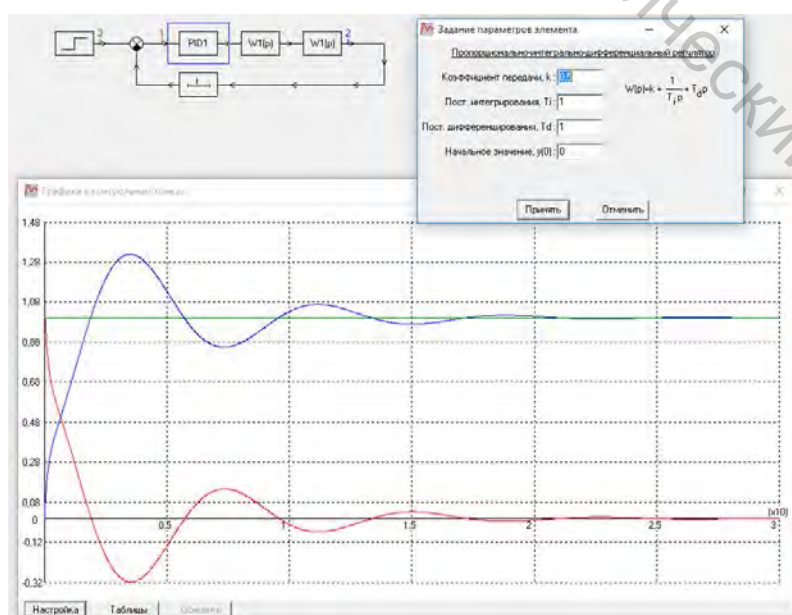


Рисунок 5.2 – Система автоматического регулирования с ПИД-регулятором

2. Построить график переходного процесса.
3. По полученному графику переходного процесса определить показатели качества: перерегулирование σ , время регулирования t_p , степень затухания Ψ , колебательность n . Данные свести в таблицу 5.1.
4. Сделать анализ качества процесса регулирования.

Таблица 5.1 – Прямые показатели качества

$T, \text{ мин}$	$\tau, \text{ мин}$	τ/T	$\Delta Y_{\max}, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \%$	Ψ	$t_p, \text{ мин}$	n

Контрольные вопросы

1. Какая САР называется линейной?
2. Что называется законом регулирования?
3. Назовите типы линейных регуляторов, запишите их передаточные функции, объясните их особенности, достоинства и недостатки.
4. Перечислите показатели качества регулирования и их определение.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОДЕЛЬЮ ГИДРОЕМКОСТИ (ПРОХОДНОЙ СЛИВ)

Цель работы: получение статической характеристики слива емкости через сливной клапан второй емкости, получение математической модели.

Краткие теоретические сведения

Если жидкость из резервуара (рис. 6.1) не откачивать насосом, а отводить самотеком по трубопроводу, на котором имеется дополнительное гидравлическое сопротивление, например вентиль, то при рассогласовании потоков на входе и выходе регулируемая величина (уровень) будет самостоятельно устанавливаться в новом равновесном состоянии.

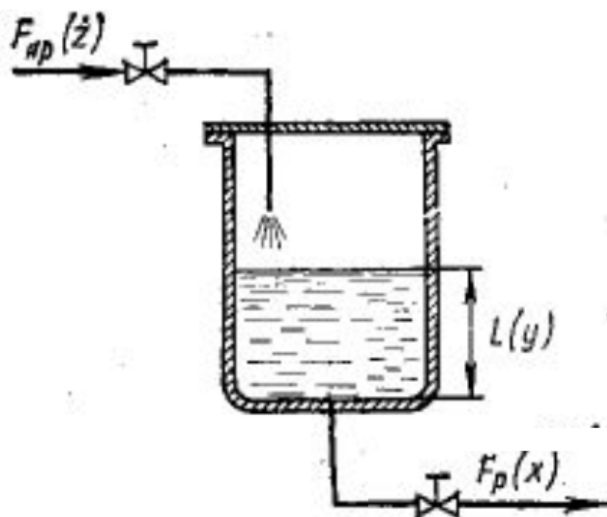


Рисунок 6.1 – Схема резервуара, из которого жидкость отводится самотёком

При ступенчатом увеличении притока жидкости F_{np} на величину ΔF (рис. 6.2) уровень L в аппарате в первый момент начнет изменяться, как и в случае нейтрального объекта (см. пунктир), со скоростью, определяемой равенством (6.1):

$$\frac{dL}{dt} = \frac{1}{A}(F_{np} - F_p), \quad (6.1)$$

где A – площадь горизонтального сечения резервуара, m^2 .

При повышении уровня возрастает гидростатический напор, что в свою очередь увеличит расход жидкости из аппарата F_p ; его зависимость от уровня L определяется по формуле:

$$F_p = \alpha A \sqrt{2gL}, \quad (6.2)$$

где α – коэффициент расхода вентиля; A – площадь его проходного сечения, m^2 ; g – ускорение свободного падения, m/s^2 .

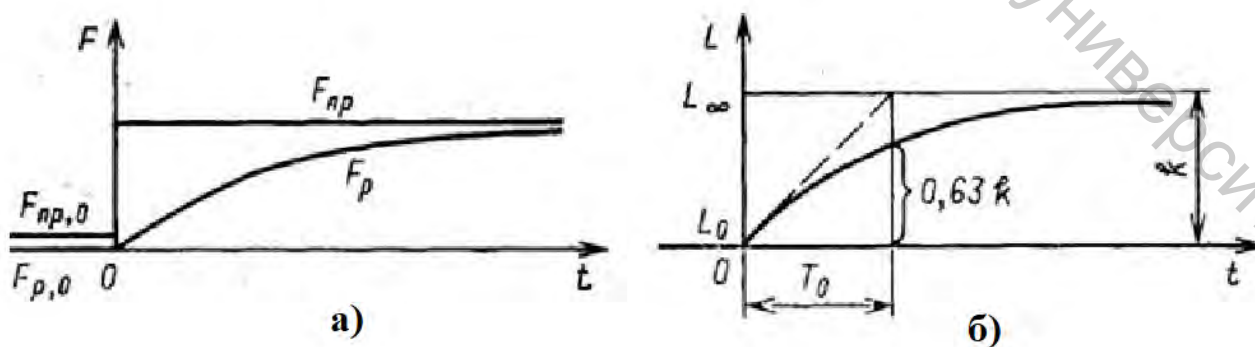


Рисунок 6.2 – Графическое изменение F_{np} и F_p в устойчивом объекте первого порядка (а) и его переходная характеристика (б)

С увеличением F_p величина возмущения $\Delta F = F_{пр} - F_p$, а, следовательно, и скорость изменения уровня уменьшаются. Со временем расход жидкости постепенно достигнет текущего значения притока, повышение ее уровня, изменяющегося по экспоненте, прекратится и наступит новое равновесное состояние объекта, но при более высоком значении уровня L_∞ . Аналогичным образом при ступенчатом уменьшении $F_{пр}$ уровень L начнет понижаться, что обусловит уменьшение расхода F_p , вследствие уменьшения гидростатического напора. Со временем между расходом и притоком жидкости восстанавливается равенство, но при более низком уровне.

Устойчивость объектов объясняется наличием в них отрицательной обратной связи. В частности, в рассматриваемом объекте обратная связь определяется равенством (6.2).

Для нахождения передаточной функции звена обратной связи линеаризуем зависимость (6.2), разлагая ее в ряд Тейлора в окрестности точки с координатами (L_0, F_{p0}) :

$$F_p = F_{p0} \alpha A \sqrt{2g} \frac{1}{2\sqrt{L_0}} (L - L_0). \quad (6.3)$$

$$\Delta F_p = \frac{\alpha A \sqrt{2g L_0}}{2} \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (6.4)$$

При расчетах систем автоматизации уравнение динамики объекта представляют в относительных величинах. Предполагая, что $F_{пр}$ является возмущением, а F_p – регулирующим воздействием. Так как входным и выходным параметрами для объекта являются $x = \Delta F / F_0$, $y = \Delta L / L_0$. Возмущение равно $z = \Delta F_{пр} / F_0$.

С учетом выражения (6.4), получим:

$$x = k_{oc} y, \quad (6.5)$$

где $k_{oc} = 0,5$.

Таким образом, в данном случае обратная связь соответствует усилительному звену с коэффициентом усиления $1/2$. Интегрирующее звено с передаточной функцией $1/T_\epsilon p$ охватывается звеном отрицательной обратной связи с передаточной функцией k_{oc} . Передаточная функция такого объекта имеет вид:

$$W(p) = \frac{\frac{1}{T_\epsilon p}}{1 + \frac{1}{T_\epsilon p} k_{oc}} = \frac{\frac{1}{k_{oc}}}{\frac{T_\epsilon}{k_{oc}} p + 1} = \frac{1}{T_0 p + 1}. \quad (6.6)$$

где $k = 1/k_{oc}$ – коэффициент усиления объекта;

$T_0 = T\varepsilon/\cos$ – постоянная времени объекта, под которой понимают время, в течение которого выходная величина достигла бы своего нового установившегося значения, если бы она изменялась с постоянной скоростью, равной скорости ее изменения в начальный момент времени, с.

При $t = T_0$ выходная величина составляет 63% нового установившегося значения. Постоянная времени объекта определяется как проекция на ось времени отрезка касательной к экспоненте, заключенного между точкой касания и точкой пересечения касательной с линией установившегося значения выходной величины (рис. 6.2 б). Длина этой проекции одинакова для касательных, проведенных к любой точке экспоненты.

Постоянная времени объекта T_0 определяет его динамические свойства. Чем она больше, тем медленнее протекает переходный процесс в объекте, и наоборот.

В соответствии с передаточной функцией (6.6) уравнение динамики устойчивого объекта первого порядка имеет вид:

$$T_0 \frac{dy}{dt} + y = kz. \quad (6.7)$$

Переходная характеристика этого объекта будет равна:

$$h(t) = y = k(1 - e^{-\frac{t}{T_0}}). \quad (6.8)$$

Таким образом, рассматриваемый объект представляет собой апериодическое звено первого порядка, коэффициент усиления k которого равен величине, обратной коэффициенту усиления обратной связи, а постоянная времени T_0 – отношению времени разгона интегрирующего звена к коэффициенту усиления обратной связи.

Порядок выполнения работы

Лабораторно-технический комплекс СГЛ-100Л предназначен для изучения принципов действия датчиков уровня и давления, работы исполнительных механизмов. Упрощенная технологическая схема лабораторно-технического комплекса СГЛ-100Л представлена на рисунке 6.3.

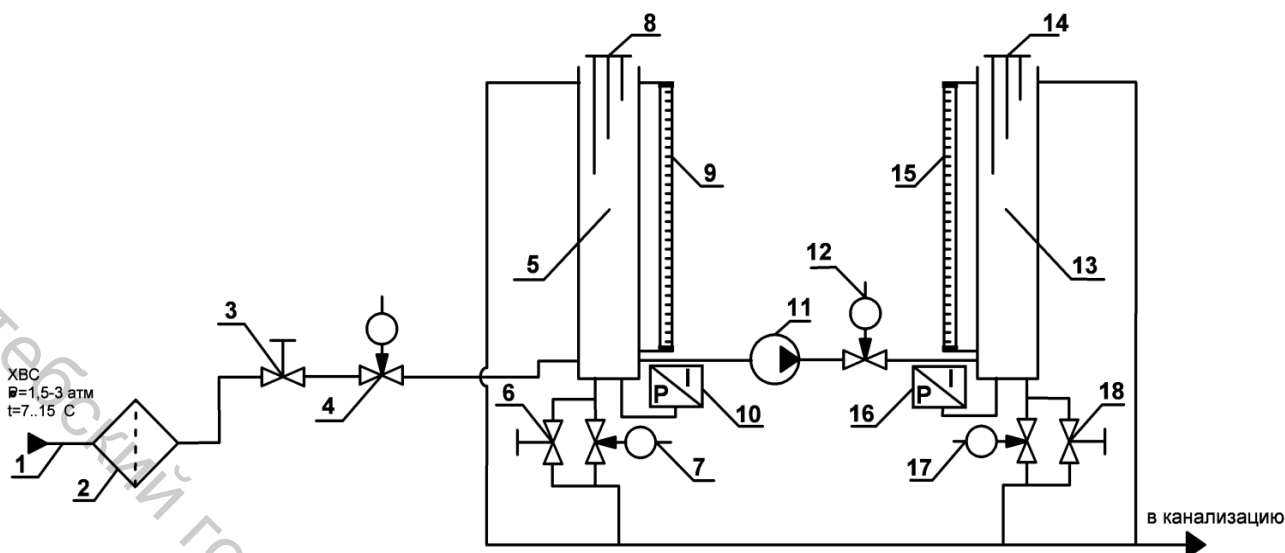


Рисунок 6.3 – Упрощенная технологическая схема стенда:

- 1 – питающая труба ХВС; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – шаровый кран входной; 4 – электромагнитный клапан входной; 5 – емкость 1; 6 – шаровый кран слива емкости 1; 7 – электромагнитный клапан слива емкости 1; 8 – кондуктометрический датчик емкости 1; 9 – пьезометр емкости 1; 10 – гидростатический преобразователь емкости 1; 11 – насос; 12 – электромагнитный клапан сообщающий; 13 – емкость 2; 14 – кондуктометрический датчик емкости 2; 15 – пьезометр емкости 2; 16 – гидростатический преобразователь емкости 2; 17 – электромагнитный клапан слива емкости 2; 18 – шаровый кран слива емкости 2

Лабораторная работа проводится в следующем порядке:

Вода от ХВС подводится по трубопроводу через фильтр и шаровый кран на электромагнитный клапан.

При подаче команды из панели оператора старта выполнения работы клапана открывается и первая емкость наполняется до начального уровня, указанного в настройках.

Далее идет ожидание стабилизации значения уровня.

Далее предоставляется выбор – автоматический слив (при помощи электромагнитного клапана), или ручной (при помощи шарового крана). После этого записывается первая точка в память панели оператора и отображается на экране в таблице данных.

Далее происходит слив воды из емкости и последовательная запись значений уровня и текущего времени от первой точки при каждом срабатывании кондуктометрического датчика.

При достижении последней точки наполнение завершено и будет отображено сообщение «Лабораторная работа окончена».

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями.

2. Перед началом выполнения лабораторной работы убедиться:

- все переключатели питающей сети находятся в положении «Выкл»;
- стенд подключен к линии ХВС и канализационной системе;

– вентили «ручного» типа находятся в закрытом положении.

3. Проверить электрические соединения, наличие повреждений проверять при неподключенном питающем вводе к сети.

Проверить качество воды в ХВС, при наличии загрязнений или ржавчины сливать воду из водопровода до очистки воды. Если вода не очистится, то обратиться к руководителю работы.

При наличии и технической возможности с помощью руководителя работы подключить флеш-накопитель к панели оператора.

Включить подачу ХВС шаровым краном.

Подключить питание сети, включить автомат управляющего ПЛК.

Дождаться загрузки главного экрана ПО стенда.

Нажмите на кнопку «Подготовка к началу работы».

Нажмите на кнопку «Далее».

Выберите лабораторную работу 6 из списка и нажмите кнопку «Далее».

Для начала лабораторной работы нажмите кнопку «Старт».

После наполнения емкости и появления сообщения «слив автоматический или ручной» нажмите на кнопку «Да» или «Нет» по указанию руководителя работы.

При выборе ручного слива необходимо открыть шаровой кран под столешницей слива емкости и нажать «ОК».

Ожидайте достижения последней точки – появления сообщения «Окончание лабораторной работы».

Для записи полученных данных в опыте на подключенный флеш-накопитель нажмите кнопку «Записать на флеш».

Нажмите на кнопку «Далее».

Для построения графика нажмите на кнопку «Построить».

Для отображения таблицы с полученными данными нажмите кнопку «Показать данные».

Для перехода на главную страницу нажмите кнопку «К главной». В появившемся предупреждении о сливе воды нажмите кнопку «Да».

После окончания слива воды повторно нажмите кнопку «К главной».

Отключить подачу ХВС шаровым краном.

Выключить автомат управляющего ПЛК, отключить питание сети.

На основе полученных данных вывести математическую модель процесса.

Таблица 6.1 – Результаты измерений лабораторной работы

№ п/п	Уровень, мм	Время, с
1		
...		
n		

Контрольные вопросы

1. Что такое статическая характеристика?

1. Что такое математическая модель?
1. Запишите уравнение материального баланса для резервуара.
2. Чему равна передаточная функция резервуара, из которого жидкость отводится самотёком?
3. Дайте характеристику входным, выходным параметрами, возмущения для математической модели резервуара.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7. ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОДЕЛЬЮ ГИДРОЕМКОСТИ (СООБЩАЮЩИЕСЯ СОСУДЫ)

Цель работы: получение статической характеристики при сообщении емкостей, получение математической модели.

Краткие теоретические сведения

В производстве вод достаточно часто используются структуры взаимосвязанных накопительных емкостей, представленных на рисунке 7.1.

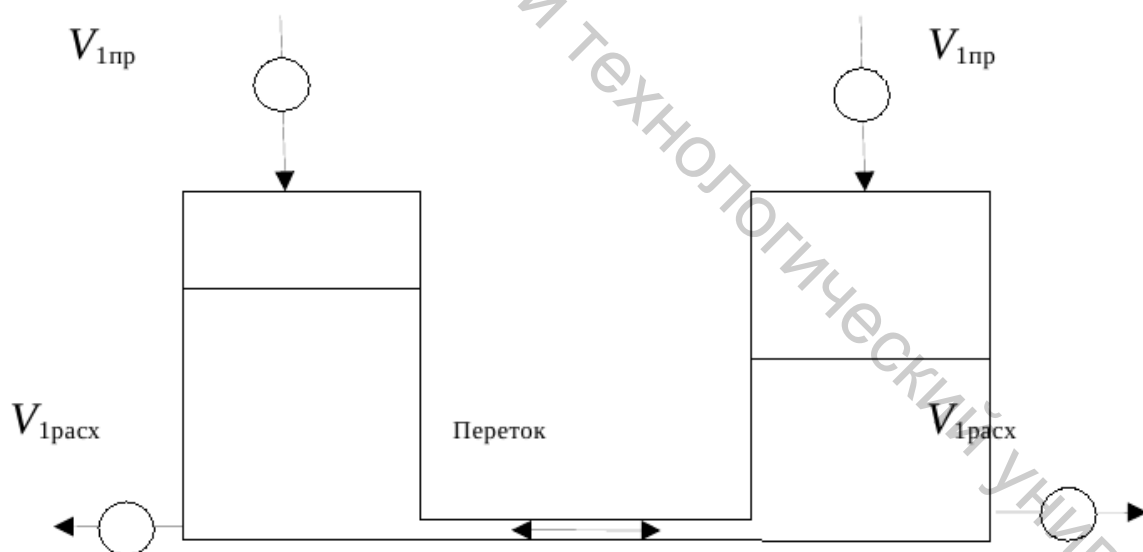


Рисунок 7.1 – Схема математической модели

На рисунке 7.1 L_1 , L_2 – высоты, м; S_1 , S_2 – сечения, м^2 ; $H_1(0)$, $H_2(0)$ – начальные уровни, м; $S_{\text{перетока}}$ – сечение перетока, м^2 ; $V_{1\text{пр}}(t)$, $V_{2\text{пр}}(t)$ – притоки, м^3 ; $V_{1\text{расх}}(t)$, $V_{2\text{расх}}(t)$ – расходы, м^3 ; $\pm V_{\text{перетока}}(t)$ – расход перетока, м^3 .

При построении математической модели этой системы как объекта управления будем считать, что расходы воды на притоке в первую $V_{1\text{пр}}(t)$ и вторую $V_{2\text{пр}}(t)$ емкости являются возмущающими воздействиями.

Управляющими воздействиями служат расходы воды на выходе емкостей $V_{1расх}(t)$ и $V_{2расх}(t)$.

Известно, что скорость истечения жидкости через отверстие пропорциональна квадратному корню из высоты уровня жидкости над отверстием, а количество жидкости, вытекающее в единицу времени и называемое расходом, можно представить в виде:

$$Q(z) = \mu \sqrt{2gz}, \quad (7.1)$$

где μ – коэффициент гидравлического сопротивления; g – ускорение свободного падения, $м/с^2$; z – текущая высота уровня жидкости в сосуде, отсчитываемая от дна сосуда, $м$.

Пусть в момент t уровни жидкости в емкостях были $H_1(t)$, $H_2(t)$. Начальные уровни $H_1(0) > H_2(0)$.

За малое время Δt скорости не изменяются, тогда за время Δt изменение уровня жидкости в 1 емкости составит:

$$\begin{aligned} \Delta H_1 &= \frac{V_{1прх}(t)\Delta t}{S_1} - \frac{V_{перетока}(t)\Delta t}{S_1} - \frac{V_{1расх}(t)\Delta t}{S_1} = \\ &= \frac{1}{S_1} \left[V_{1прх}(t) - \mu S_{перетока} \sqrt{2g(H_1(t) - H_2(t))} - V_{1расх}(t) \right] \Delta t \end{aligned} \quad (7.2)$$

За время Δt изменение уровня жидкости в 2 емкости составит:

$$\begin{aligned} \Delta H_2 &= \frac{V_{2прх}(t)\Delta t}{S_2} + \frac{V_{перетока}(t)\Delta t}{S_2} - \frac{V_{2расх}(t)\Delta t}{S_2} = \\ &= \frac{1}{S_2} \left[V_{2прх}(t) + \mu S_{перетока} \sqrt{2g(H_1(t) - H_2(t))} - V_{2расх}(t) \right] \Delta t \end{aligned} \quad (7.3)$$

Переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получим выражения:

$$\begin{cases} \frac{dH_1(t)}{dt} = \frac{1}{S_1} \left[V_{1прх}(t) - \mu S_{перетока} \sqrt{2g(H_1(t) - H_2(t))} - V_{1расх}(t) \right] \\ \frac{dH_2(t)}{dt} = \frac{1}{S_2} \left[V_{2прх}(t) + \mu S_{перетока} \sqrt{2g(H_1(t) - H_2(t))} - V_{2расх}(t) \right] \end{cases} \quad (7.4)$$

Примем коэффициенты:

$$A = \mu S \frac{1}{2\sqrt{2g(H_1^0 - H_2^0)}}; \quad (7.5)$$

$$B = \mu S \sqrt{2g(H_1^0 - H_2^0)}.$$

Подставим А и В в систему (7.4), получим:

$$H_1 = \frac{S_2 H_2' - V_{2npux} - B + A H_2 + V_{2pacx}}{A}; \quad (7.6)$$

$$H_2 = \frac{S_1 H_1' - V_{1np} + B + A H_1 + V_{1pacx}}{A}.$$

Принимаем $V_{2npux} = \text{const}$, $B = \text{const}$, $V_{2pacx} = \text{const}$. Продифференцируем выражения (7.6):

$$\begin{cases} S_2 p^2 H_2(p) + \left[\frac{A}{S_1} S_2 + A \right] p H_2(p) = c_1 \\ S_1 p^2 H_1(p) + \left[\frac{A}{S_2} S_1 + A \right] p H_1(p) = c_2 \end{cases} \quad (7.7)$$

где $c_1 = A/S_1 * [V_{1npux} + V_{2npux} - V_{2pacx} - V_{1pacx}]$;
 $c_2 = A/S_2 * [-V_{1np} + V_{1np} + V_{1pacx} - V_{1pacx}]$.

Полученная система операторных уравнений является моделью системы сообщающихся емкостей, как объекта управления, которая позволяет вывод передаточных функций по определенным каналам управления и последующим моделированием переходных процессов.

Порядок выполнения работы

Лабораторно-технический комплекс СГЛ-100Л предназначен для изучения принципов действия датчиков уровня и давления, работы исполнительных механизмов. Упрощенная технологическая схема лабораторно-технического комплекса СГЛ-100Л представлена на рисунке 6.3.

Лабораторная работа проводится в следующем порядке.

Вода от ХВС подводится по трубопроводу через фильтр и шаровой кран на электромагнитный клапан.

При подаче команды из панели оператора старта выполнения работы клапан открывается и первая емкость наполняется до начального уровня, указанного в настройках.

Далее идет ожидание стабилизации значения уровня.

После этого записывается первая точка в память панели оператора и отображается на экране в таблице данных.

Далее происходит набор воды в емкость и последовательная запись значений уровня и текущего времени от первой точки каждую секунду. При достижении одинакового уровня в обеих емкостях будет выдержано время, после будет отображено сообщение «Лабораторная работа окончена».

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями.
2. Перед началом выполнения лабораторной работы убедиться:
 - все переключатели питающей сети находятся в положении «Выкл»;
 - стенд подключен к линии ХВС и канализационной системе;
 - вентили «ручного» типа находятся в закрытом положении.

Проверить электрические соединения, наличие повреждений проверять при неподключенном питающем вводе к сети.

Проверить качество воды в ХВС, при наличии загрязнений или ржавчины сливать воду из водопровода до очистки воды. Если вода не очистится, то обратиться к руководителю работы.

При наличии и технической возможности с помощью руководителя работы подключить флеш-накопитель к панели оператора.

Включить подачу ХВС шаровым краном.

Подключить питание сети, включить автомат управляющего ПЛК.

Дождаться загрузки главного экрана ПО стенда.

Нажмите на кнопку «Подготовка к началу работы».

Нажмите на кнопку «Далее».

Выберите лабораторную работу 7 из списка и нажмите кнопку «Далее».

Для начала лабораторной работы нажмите кнопку «Старт».

Ожидайте окончания процесса – появления сообщения «Окончание лабораторной работы».

Для записи полученных данных в опыте на подключенный флеш-накопитель нажмите кнопку «Записать на флеш».

Нажмите на кнопку «Далее».

Для построения графика нажмите на кнопку «Построить».

Для отображения таблицы с полученными данными нажмите кнопку «Показать данные».

Для перехода на главную страницу нажмите кнопку «К главной». В появившемся предупреждении о сливе воды нажмите кнопку «Да».

После окончания слива воды повторно нажмите кнопку «К главной».

Отключить подачу ХВС шаровым краном.

Выключить автомат управляющего ПЛК, отключить питание сети.

На основе полученных данных вывести математическую модель процесса.

Таблица 7.1 – Результаты измерений лабораторной работы

№ п/п	Уровень емкости 1, мм	Уровень емкости 2, мм	Время, с
1			
...			
n			

Контрольные вопросы

1. Что такое статическая характеристика?
1. Что такое абсолютная погрешность измерения?
2. Чему равен расход жидкости во взаимосвязанных емкостях?
3. От каких параметров зависят уровни жидкости в емкостях 1 и 2?
4. Какие показатели являются возмущающими воздействиями при построении математической модели?
5. Какие показатели являются управляющими воздействиями при построении математической модели?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8. ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

Цель работы: изучение основных методов настройки ПИД-регулятора и определение показателей качества регулятора

Краткие теоретические сведения

Общие сведения о ПИД-регуляторе

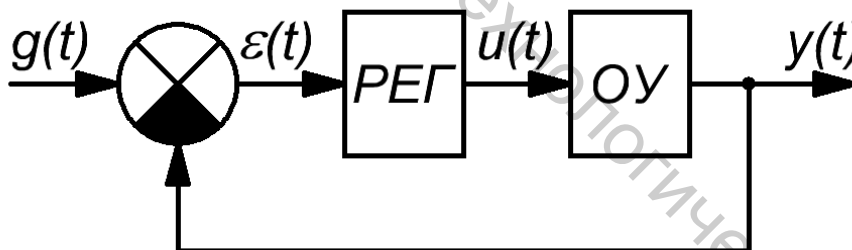


Рисунок 8.1 – Обобщенная структура системы с регулятором

ПИД-регулятор – один из самых распространенных автоматических регуляторов. Он настолько универсален, что применяется практически везде, где нужно автоматическое управление. Например, температурой: специальные печи, холодильники, инкубаторы, паяльники, сопло и стол 3D-принтера, ИК паяльные станции и прочее. Поддержание частоты оборотов мотора, например, для станков. Всевозможные балансирующие штуки, гироскутеры, сигвеи, левитирующие магнитные платформы, и, конечно же, квадрокоптеры и самолёты с автопилотом. Это всё ПИД-регулятор. Почему именно ПИД? Существуют и другие регуляторы, превосходящие ПИД по адаптивности к управляемой системе и стабильности, например, линейно-квадратичный. Настройка ПИД-регулятора очень проста, а сам ПИД-регулятор универсален для почти любого процесса.

ПИД-регулятор состоит из трёх составляющих: пропорциональной P , интегрирующей I и дифференцирующей D , формируется просто как сумма трёх значений, умноженных каждая на свой коэффициент:

$$u(t) = K_p P + K_I I + K_D D \quad (8.1)$$

Пропорциональная составляющая предоставляет собой ошибку регулирования, то есть, насколько далеко находится система от заданного значения:

$$P = \varepsilon(t) \quad (8.2)$$

Получается, чем больше ошибка, тем больше будет управляющий сигнал и тем быстрее система будет приводить управляемую величину к заданному значению. Коэффициент K_p (тут имеется роль усиления ошибки) настраивается вручную. Но в то же время, если система пришла к заданной величине, ошибка станет равной нулю, и управляющий сигнал тоже! П-регулятор никогда не сможет привести к заданному значению, всегда будет некая ошибка.

Интегральная составляющая просто суммирует в саму себя ту же самую ошибку, умноженную на период дискретизации системы, то есть на время, прошедшее с предыдущего расчёта, dt – фактически берёт интеграл от ошибки по времени:

$$I = \int \varepsilon(t) dt \quad (8.3)$$

В самом регуляторе это ещё умножается на коэффициент K_I , которым настраивается резкость данной составляющей. В интегральной составляющей буквально копится ошибка, что позволяет регулятору с течением времени полностью её устранить, то есть привести систему ровно к заданному значению с максимальной точностью. I составляющая исправляет прошлые, накопившиеся ошибки.

Дифференциальная составляющая представляет собой разность текущей и предыдущей ошибки, поделенную на время между измерениями, то есть на ту же dt . Иными словами – это производная от ошибки по времени:

$$D = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (8.4)$$

Фактически D -составляющая реагирует на изменение сигнала с датчика, и чем сильнее происходит это изменение, тем большее значение прибавляется к общей сумме. Иными словами, D позволяет компенсировать резкие изменения в системе и при правильной настройке предотвратить сильное перерегулирование и уменьшить раскачку. Коэффициент K_D

позволяет настроить вес, или резкость данной компенсации, как и остальные коэффициенты регулируют свои составляющие. Д составляющая в первую очередь нужна для быстрых систем, то есть для систем с резкими изменениями, такими как квадрокоптер или шпиндель станка под переменной нагрузкой. Д составляющая исправляет возможные будущие ошибки, анализируя скорость.

Методы настройки регуляторов

Существует большое количество методов настройки ПИД-регуляторов. Рассмотрим некоторые из них. Большинство из них предполагает, что математическая модель объекта управления аппроксимируется моделью первого порядка с запаздыванием с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{Ke^{-p\tau}}{Tp + 1} \quad (8.5)$$

1. Метод Зиглера – Николса.

Зиглер и Николс предложили два метода настройки линейных регуляторов. Один из них основан на параметрах переходной характеристики, второй – на частотных характеристиках объекта.

Формулы для расчета параметров наиболее распространенных линейных регуляторов по первому методу Зиглера – Николса представлены в таблице 8.1. Структурная схема системы при этом будет иметь вид, представленный на рисунке 8.2.

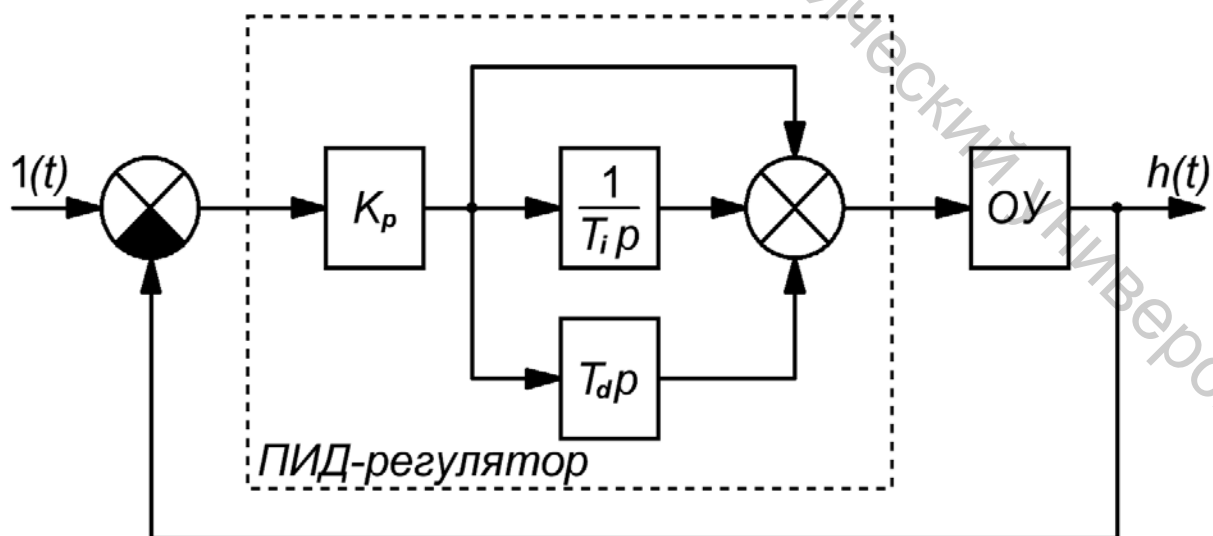


Рисунок 8.2 – Схема моделирования системы с ПИД-регулятором

Таблица 8.1 – Расчет параметров регуляторов по первому методу Зиглера – Николса

Регулятор	K_p	T_i	T_d
П	$\frac{T}{\tau K}$		
ПИ	$0,9 \frac{T}{\tau K}$	$3,3\tau$	
ПИД	$1,2 \frac{T}{\tau K}$	2τ	$0,5\tau$

Второй метод Зиглера – Николса предполагает определение критического коэффициента усиления K_u и критической постоянной времени T_u .

На практике это делают следующим образом: сначала выставляем коэффициенты $T_i = \infty$ и $T_d = 0$. Плавное увеличиваем K_p до появления постоянных колебаний. Значение K_p , при котором они появились, записываем и обозначаем как K_u . Далее замеряем период колебаний системы в секундах и обозначаем как T_u . Итоговые коэффициенты получаем по таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Расчет параметров регуляторов по второму методу Зиглера – Николса

Регулятор	K_p	T_i	T_d
П	$0,5K_u$		
ПИ	$0,45K_u$	$\frac{T_u}{1,2}$	
ПИД	$0,6K_u$	$\frac{T_u}{2}$	$\frac{T_u}{8}$

2. Метод AMIGO.

Данный метод получен путем практического исследования систем управления и анализа их свойств.

Параметры настройки ПИД-регулятора методом AMIGO определяются по формулам:

$$K_p = \left(0,2 + 0,45 \frac{T}{\tau} \right) \frac{1}{K} \quad (8.6)$$

$$T_i = \left(\frac{0,4\tau + 0,8T}{\tau + 0,1T} \right) \tau \quad (8.7)$$

$$T_d = \frac{0,5\tau T}{0,3\tau + T} \quad (8.8)$$

3. Метод А.П. Копеловича.

Данный метод позволяет получить три оптимальных процесса регулирования: апериодический с минимальным временем регулирования, с

перерегулированием 20% и с минимальным среднеквадратичным отклонением от заданного значения.

Формулы для расчета параметров наиболее распространенных линейных регуляторов по методу Копеловича представлены в таблице 8.3.

Таблица 8.3 – Расчет параметров регуляторов по первому методу Копеловича

Регулятор	Типовой процесс регулирования		
	<i>апериодический</i>	<i>с перерегулированием 20%</i>	$J_{\min}$
П	$K_p = \frac{0,3T}{K\tau}$	$K_p = \frac{0,7T}{K\tau}$	$K_p = \frac{0,9T}{K\tau}$
ПИ	$K_p = \frac{0,6T}{K\tau}$ $T_i = 0,6T$	$K_p = \frac{0,7T}{K\tau}$ $T_i = 0,7T$	$K_p = \frac{T}{K\tau}$ $T_i = T$
ПИД	$K_p = \frac{0,95T}{K\tau}$ $T_i = 2,4\tau$ $T_d = 0,4\tau$	$K_p = \frac{1,2T}{K\tau}$ $T_i = 2\tau$ $T_d = 0,4\tau$	$K_p = \frac{1,4T}{K\tau}$ $T_i = 1,3\tau$ $T_d = 0,5\tau$

Порядок выполнения работы

Переходную функцию объекта можно получить, если взять обратное преобразование Лапласа от передаточной функции, разделенной на p . Получим уравнение $h(t)$ с использованием Matlab:

```
>> syms K T p t
>> tau=sym('tau','positive');
>> W=K*exp(-p*tau)/(T*p + 1);
>> h=ilaplace(W/p,p,t)
```

h =

```
-K*heaviside(t - tau)*(exp(-(t - tau)/T) - 1)
```

В результате эксперимента была снята переходная характеристика объекта управления, результаты измерения записаны в файл «D:\rez.txt».

Извлечем данные из файла:

```
>> DATA = dlmread('D:\\rez.txt');
```

В результате получили массив DATA, состоящий из двух столбцов: первый столбец – значения времени t , второй – значения переходной функции $h(t)$. Разделим массив DATA на два вектора:

```
>> t = DATA(:,1); h = DATA(:,2);
```

Используя приложение Curve Fitting Toolbox, получим параметры модели объекта. Для этого в командной строке Matlab напишем команду:

```
>> cftool
```

Появится окно приложения. В раскрывающихся списках X data и Y data следует выбрать имена глобальных переменных рабочей среды MATLAB, т.е. t и h, соответственно. После этого на правой панели окна приложения построится примерный график выбранных данных.

Выбираем модель Custom Equation и вписываем туда полученное уравнение для h(t), принимая K=20. Получаем T=4,314 с, $\tau = 3,79$ с.

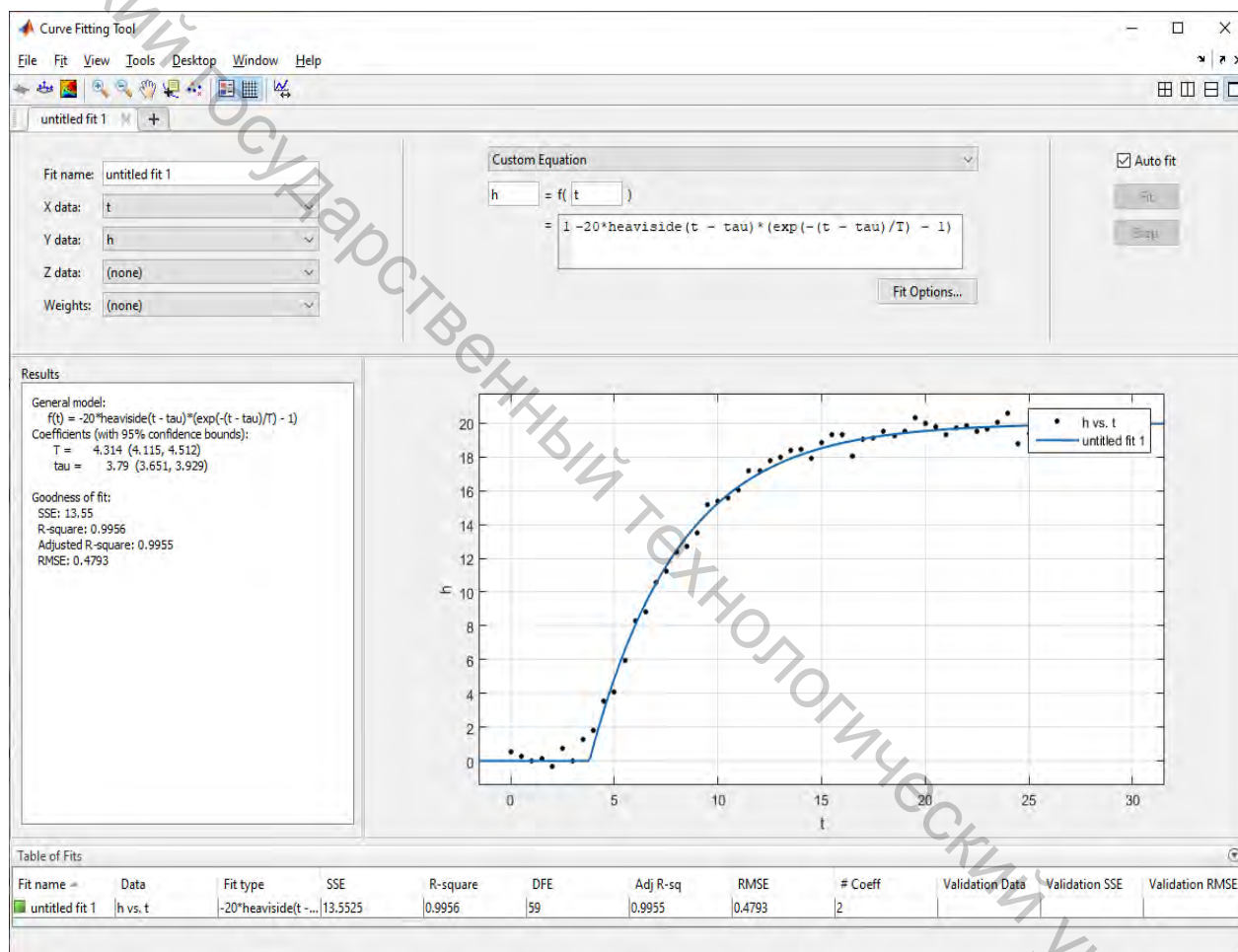


Рисунок 8.3 – Определение параметров модели в приложении Curve Fitting Toolbox

Запустим приложение моделирования Simulink:

```
>> simulink
```

Появляется окно Simulink Library Browser. В нем нажимаем на кнопку New Model. В появившемся окне соберем схему, представленную на рисунке 8.4.

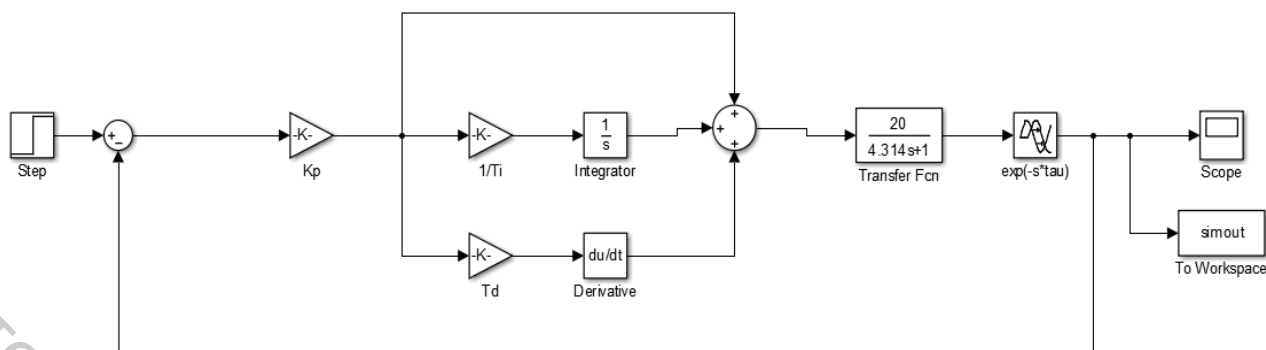


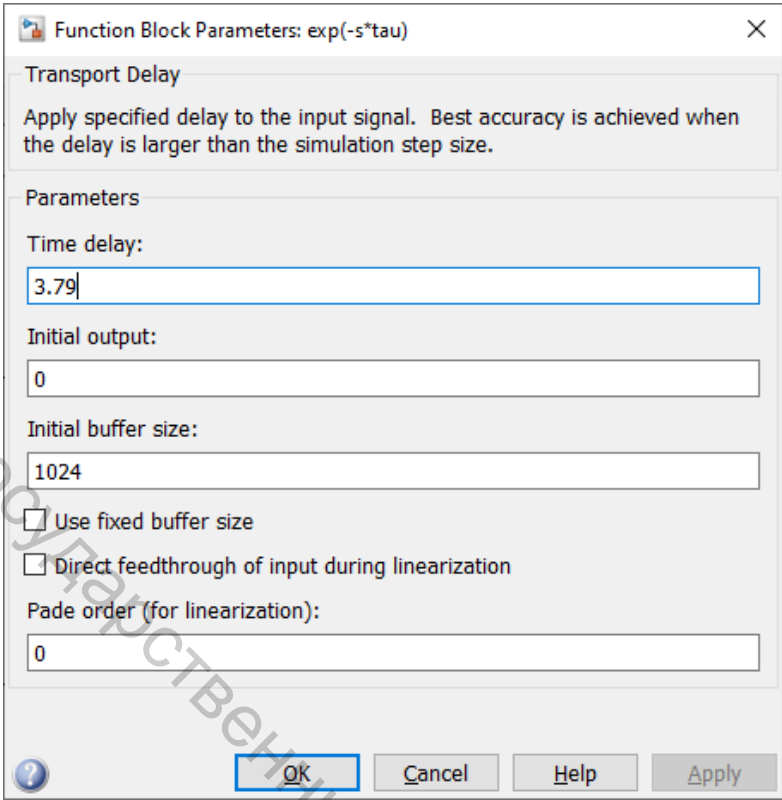
Рисунок 8.4 – Схема моделирования системы с ПИД-регулятором в приложении Simulink

Элементы перетаскиваем из окна Simulink Library Browser. Необходимы следующие элементы:

Элемент	Расположение
 Integrator	Simulink → Continuous → Integrator
 Derivative	Simulink → Continuous → Derivative
 Transport Delay	Simulink → Continuous → Transport Delay
 Transfer Fcn	Simulink → Continuous → Transfer Fcn
 Gain	Simulink → Math Operations → Gain
 Sum	Simulink → Math Operations → Sum
 Scope	Simulink → Sinks → Scope
 To Workspace	Simulink → Sinks → To Workspace
 Step	Simulink → Sources → Step

Для следующих блоков задаем настройки как показано на рисунках:

Transport Delay:



Function Block Parameters: exp(-s*tau)

Transport Delay

Apply specified delay to the input signal. Best accuracy is achieved when the delay is larger than the simulation step size.

Parameters

Time delay:

3.79

Initial output:

0

Initial buffer size:

1024

☐ Use fixed buffer size

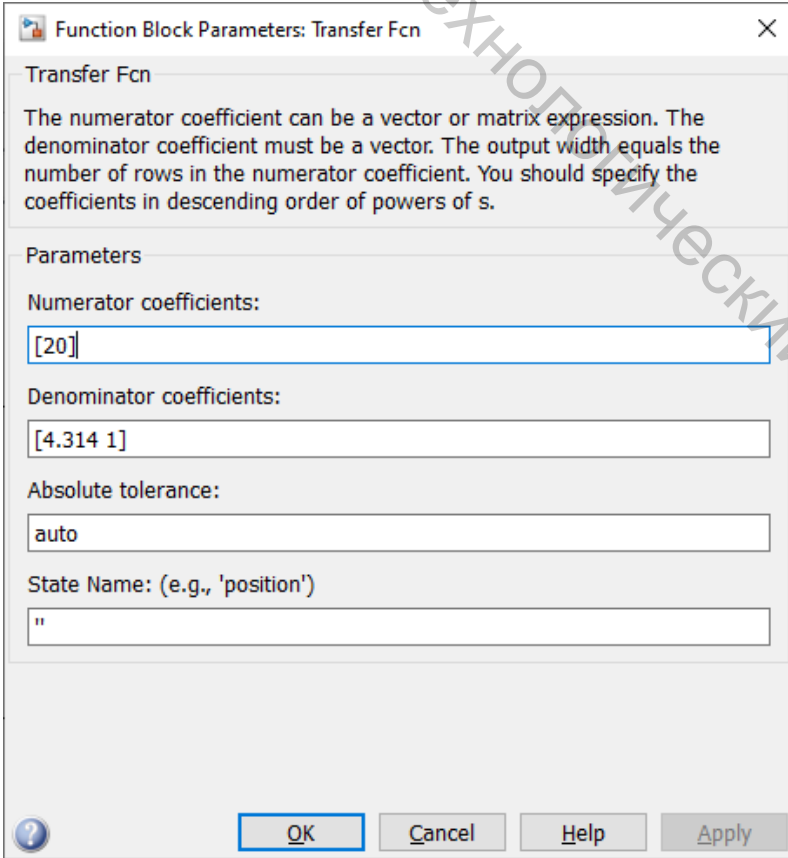
☐ Direct feedthrough of input during linearization

Pade order (for linearization):

0

OK Cancel Help Apply

Transfer Fcn:



Function Block Parameters: Transfer Fcn

Transfer Fcn

The numerator coefficient can be a vector or matrix expression. The denominator coefficient must be a vector. The output width equals the number of rows in the numerator coefficient. You should specify the coefficients in descending order of powers of s.

Parameters

Numerator coefficients:

[20]

Denominator coefficients:

[4.314 1]

Absolute tolerance:

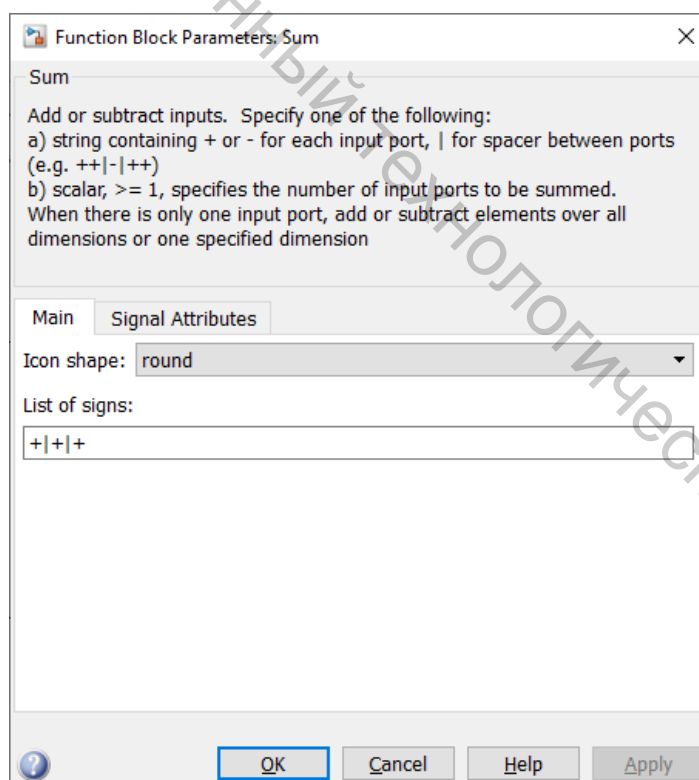
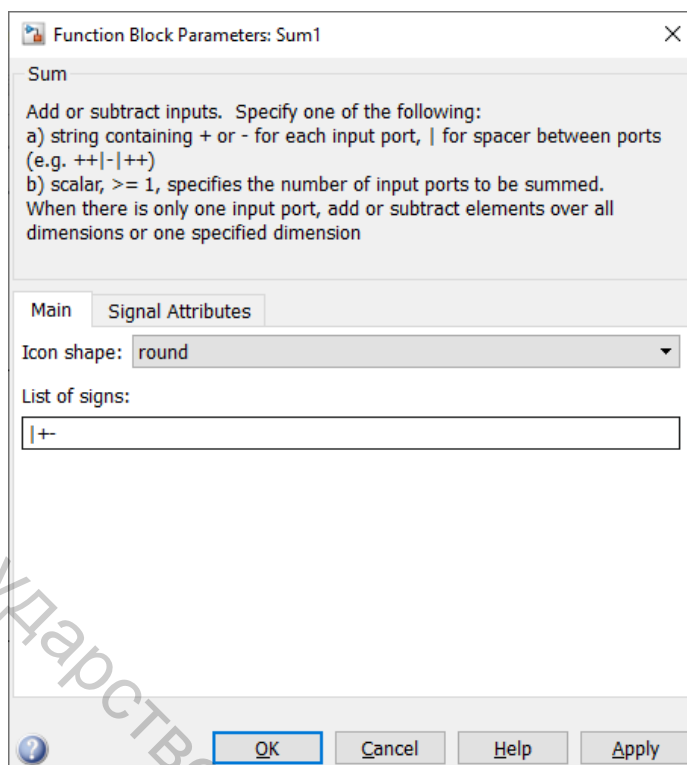
auto

State Name: (e.g., 'position')

"

OK Cancel Help Apply

Sum



В настройках элемента Gain в поле Gain необходимо указывать значения K_p , $1/T_i$ и T_d для моделируемого метода соответственно.

Время моделирования задается, как показано на рисунке:

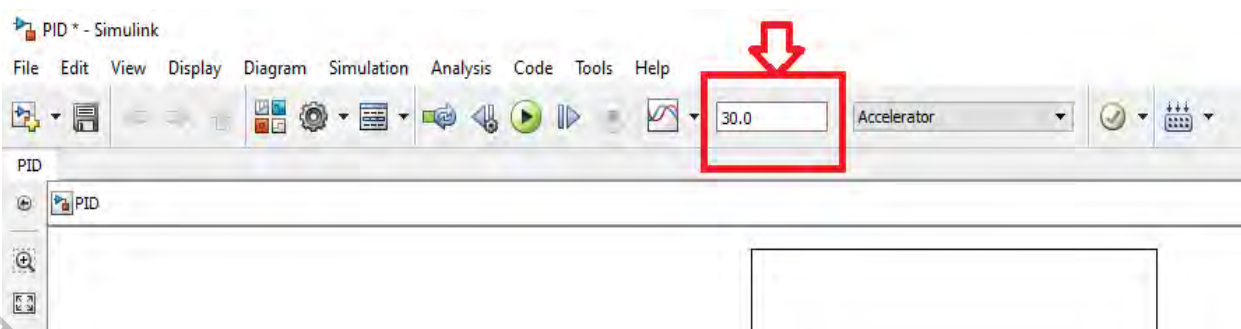


График с результатами моделирования можно увидеть после запуска моделирования двойным нажатием на Score.

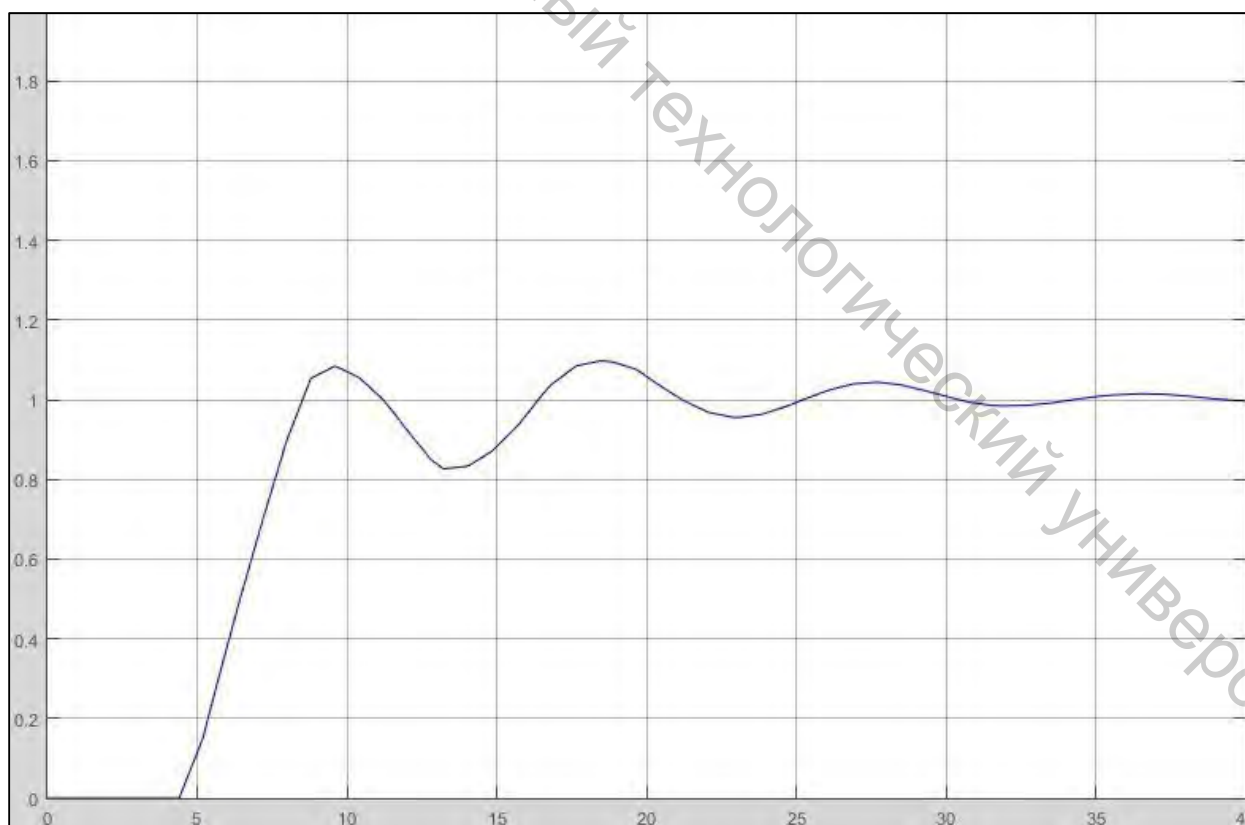
Рассчитаем параметры ПИД-регулятора по первому методу Зиглера – Николса и зададим их в соответствующих блоках модели на рисунке 8.4:

$$K_p = 1,2 \frac{T}{\tau K} = 1,2 \frac{4,13}{3,79 \cdot 20} = 0,0654 \quad (8.9)$$

$$T_i = 2\tau = 2 \cdot 3,79 = 7,58c \quad (8.10)$$

$$T_d = 0,5\tau = 0,5 \cdot 3,79 = 1,895c \quad (8.11)$$

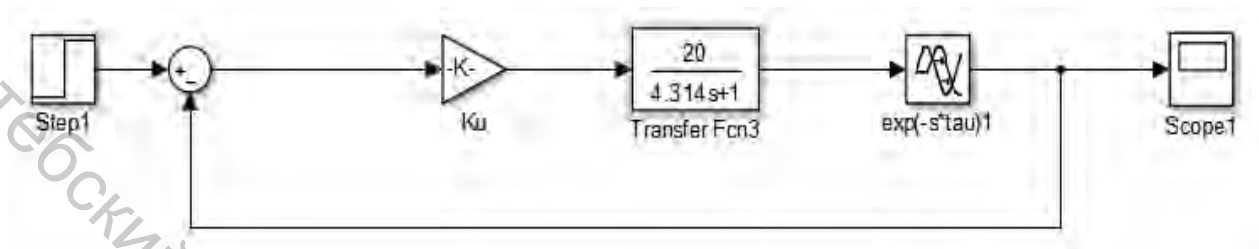
В окне Score имеем следующий график:



Для сохранения данных моделирования в рабочем окне пишем следующую команду:

```
>> t1=simout.Time;
>> h1=simout.Data;
```

Для расчета параметров по второму методу Зиглера – Николса собираем следующую схему:



Параметр Gain в блоке Ku подбираем таким образом, чтобы график в окне Scope1 представлял собой постоянные колебания.

Получаем $K_u = 0,1235$.

По графику в окне Scope1 определяем период колебаний $T_u = 11,98$ с.

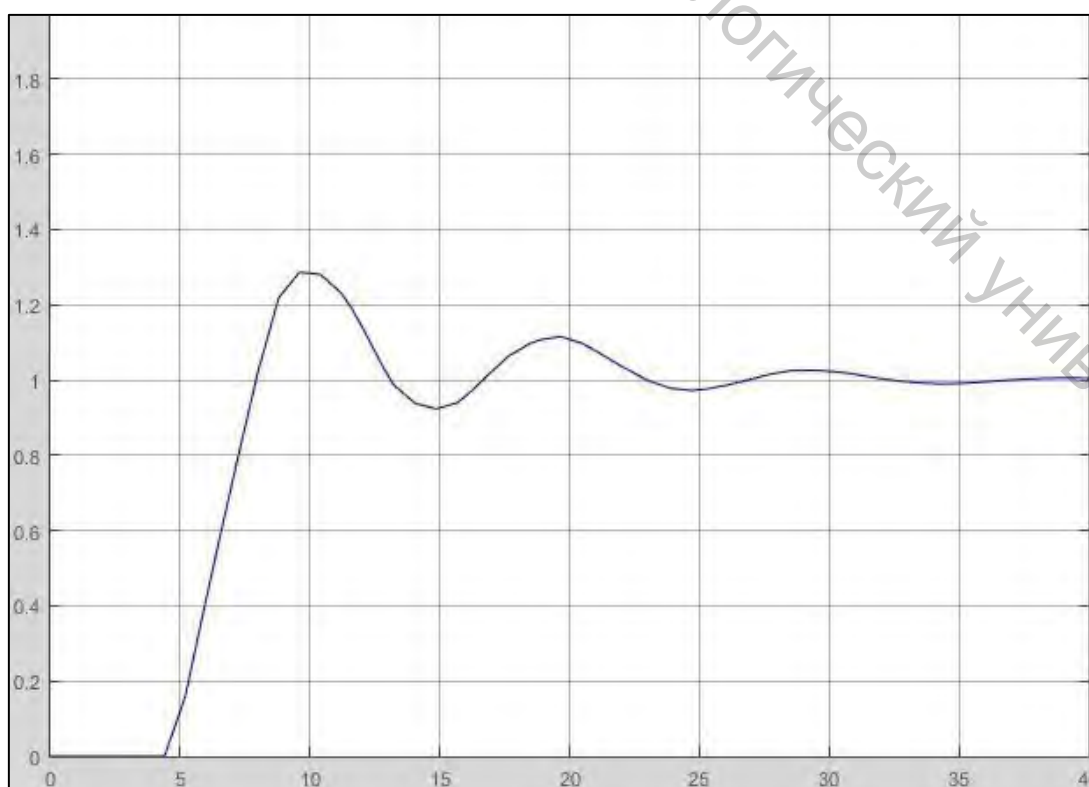
Рассчитаем параметры ПИД-регулятора и зададим их в соответствующих блоках модели на рисунке 8.4:

$$K_p = 0,6K_u = 0,6 \cdot 0,1235 = 0,0741 \quad (8.12)$$

$$T_i = \frac{T_u}{2} = \frac{11,98}{2} = 5,99 \text{ с} \quad (8.13)$$

$$T_d = \frac{T_u}{8} = \frac{11,98}{8} = 1,4975 \text{ с} \quad (8.14)$$

В окне Scope имеем следующий график:



Сохраняем данные моделирования:

```
>> t2=simout.Time;  
>> h2=simout.Data;
```

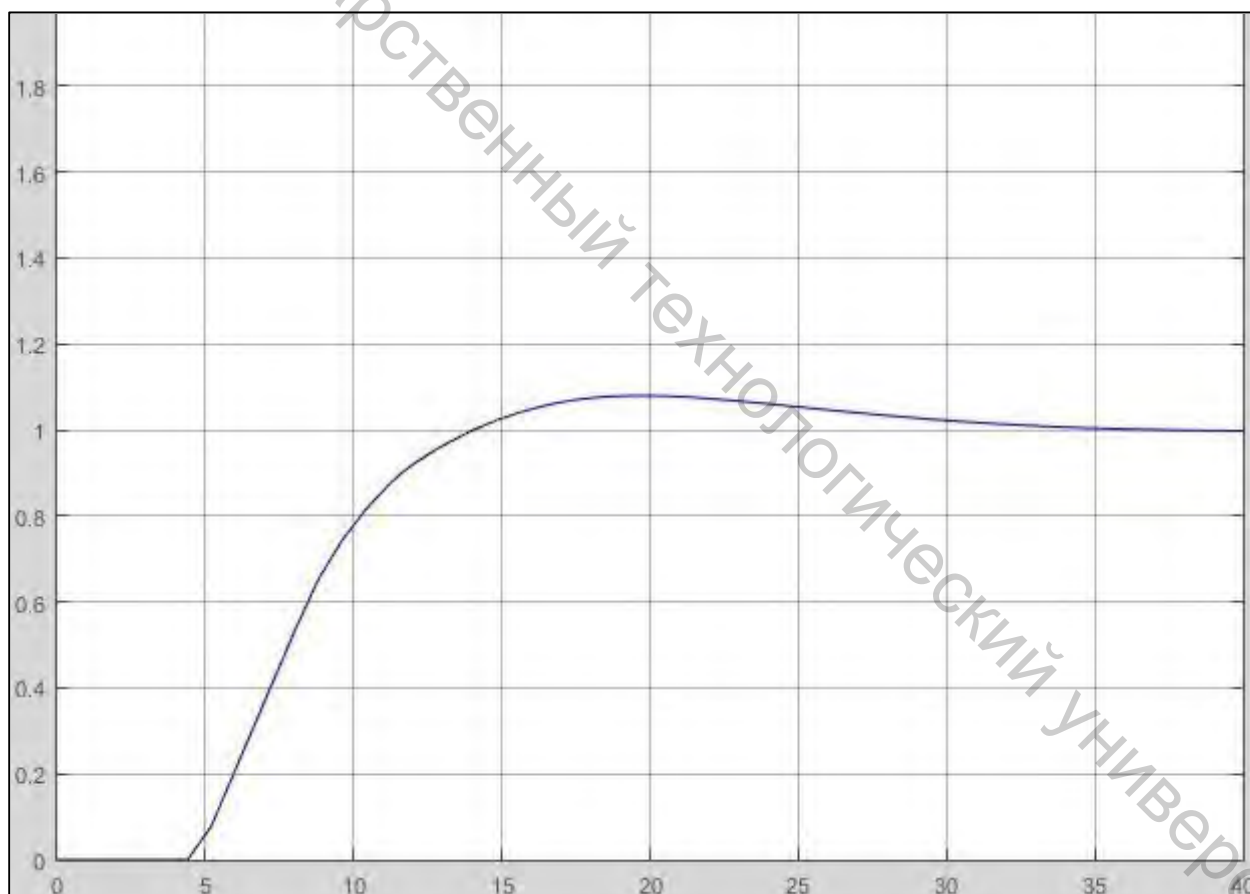
Рассчитаем параметры ПИД-регулятора по методу AMIGO и зададим их в соответствующих блоках модели на рисунке 8.4:

$$K_p = \left(0,2 + 0,45 \frac{T}{\tau} \right) \frac{1}{K} = \left(0,2 + 0,45 \frac{4,314}{3,79} \right) \frac{1}{20} = 0,0356 \quad (8.15)$$

$$T_i = \left(\frac{0,4\tau + 0,8T}{\tau + 0,1T} \right) \tau = \left(\frac{0,4 \cdot 3,79 + 0,8 \cdot 4,314}{3,79 + 0,1 \cdot 4,314} \right) \cdot 3,79 = 4,4596c \quad (8.16)$$

$$T_d = \frac{0,5\tau T}{0,3\tau + T} = \frac{0,5 \cdot 3,79 \cdot 4,314}{0,3 \cdot 3,79 + 4,314} = 1,4997c \quad (8.17)$$

В окне Scope имеем следующий график:



Сохраняем данные моделирования:

```
>> t3=simout.Time;  
>> h3=simout.Data;
```

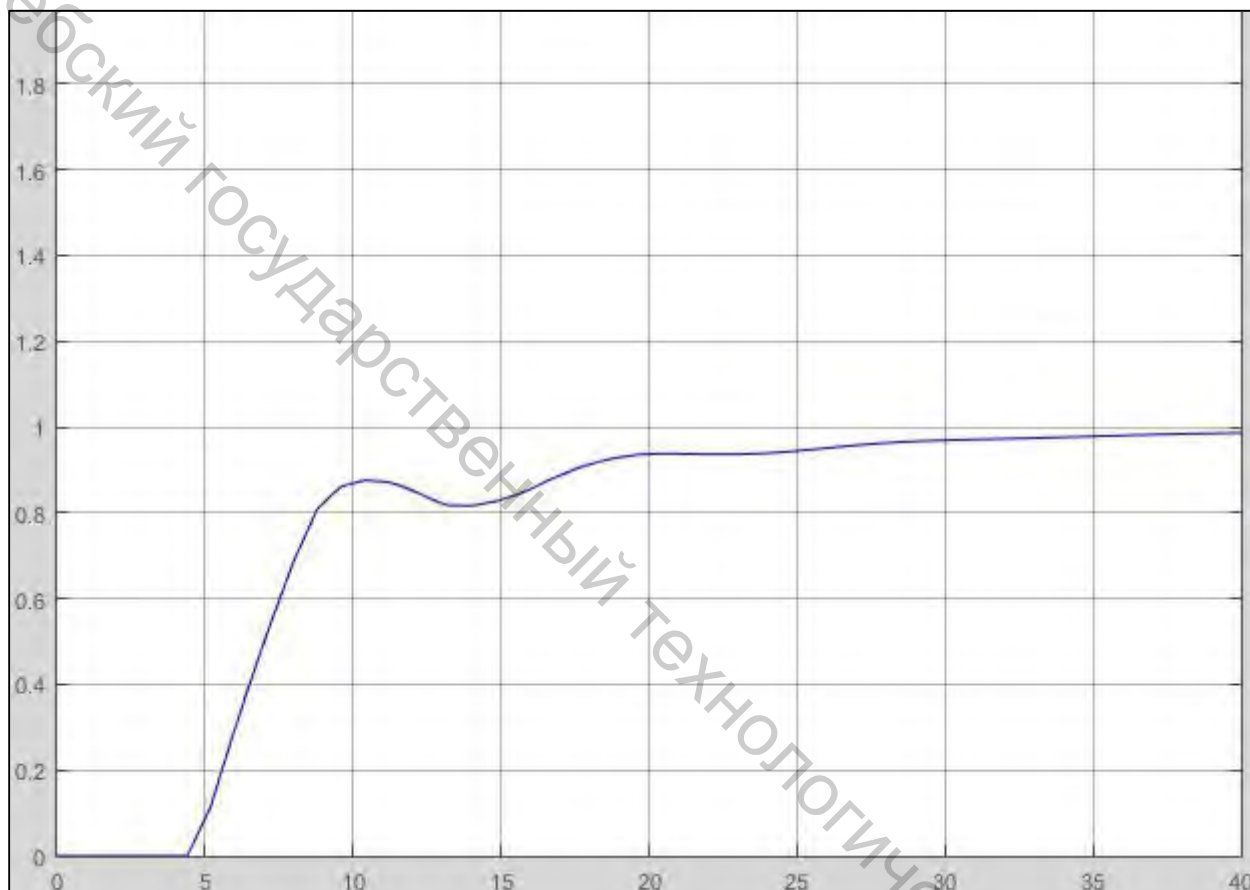
Рассчитаем параметры ПИД-регулятора по методу Копеловича с апериодическим процессом и зададим их в соответствующих блоках модели на рисунке 8.4:

$$K_p = \frac{0,95T}{K\tau} = \frac{0,95 \cdot 4,314}{20 \cdot 3,79} = 0,0541 \quad (8.18)$$

$$T_i = 2,4\tau = 2,4 \cdot 3,79 = 9,096c \quad (8.19)$$

$$T_d = 0,4\tau = 0,4 \cdot 3,79 = 1,516c \quad (8.20)$$

В окне Scope имеем следующий график:



Сохраняем данные моделирования:

```
>> t4=simout.Time;  
>> h4=simout.Data;
```

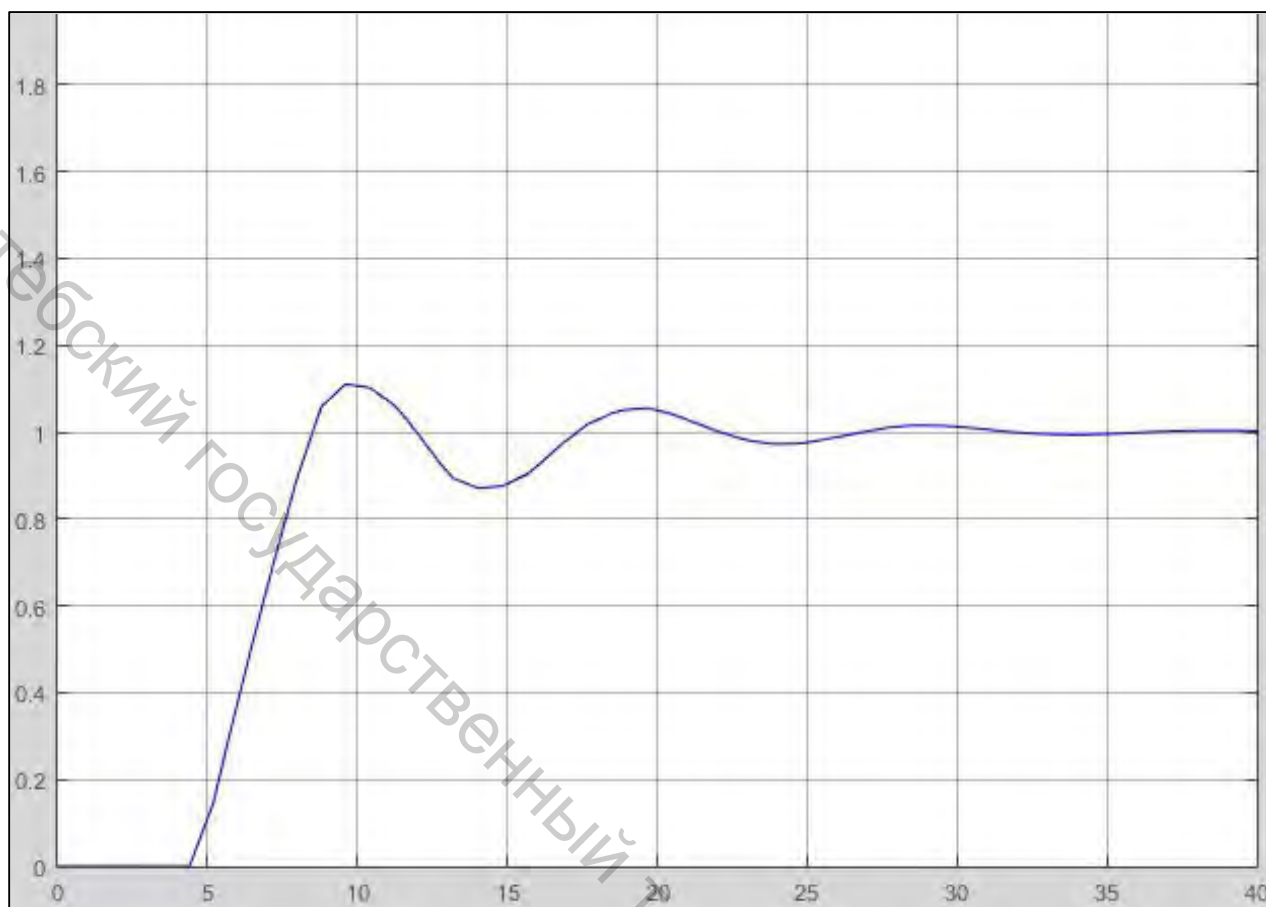
Рассчитаем параметры ПИД-регулятора по методу Копеловича с перерегулированием 20% и зададим их в соответствующих блоках модели на рисунке 8.4:

$$K_p = \frac{1,2T}{K\tau} = \frac{1,2 \cdot 4,314}{20 \cdot 3,79} = 0,0683 \quad (8.21)$$

$$T_i = 2\tau = 2 \cdot 3,79 = 7,58c \quad (8.22)$$

$$T_d = 0,4\tau = 0,4 \cdot 3,79 = 1,516c \quad (8.23)$$

В окне Score имеем следующий график:

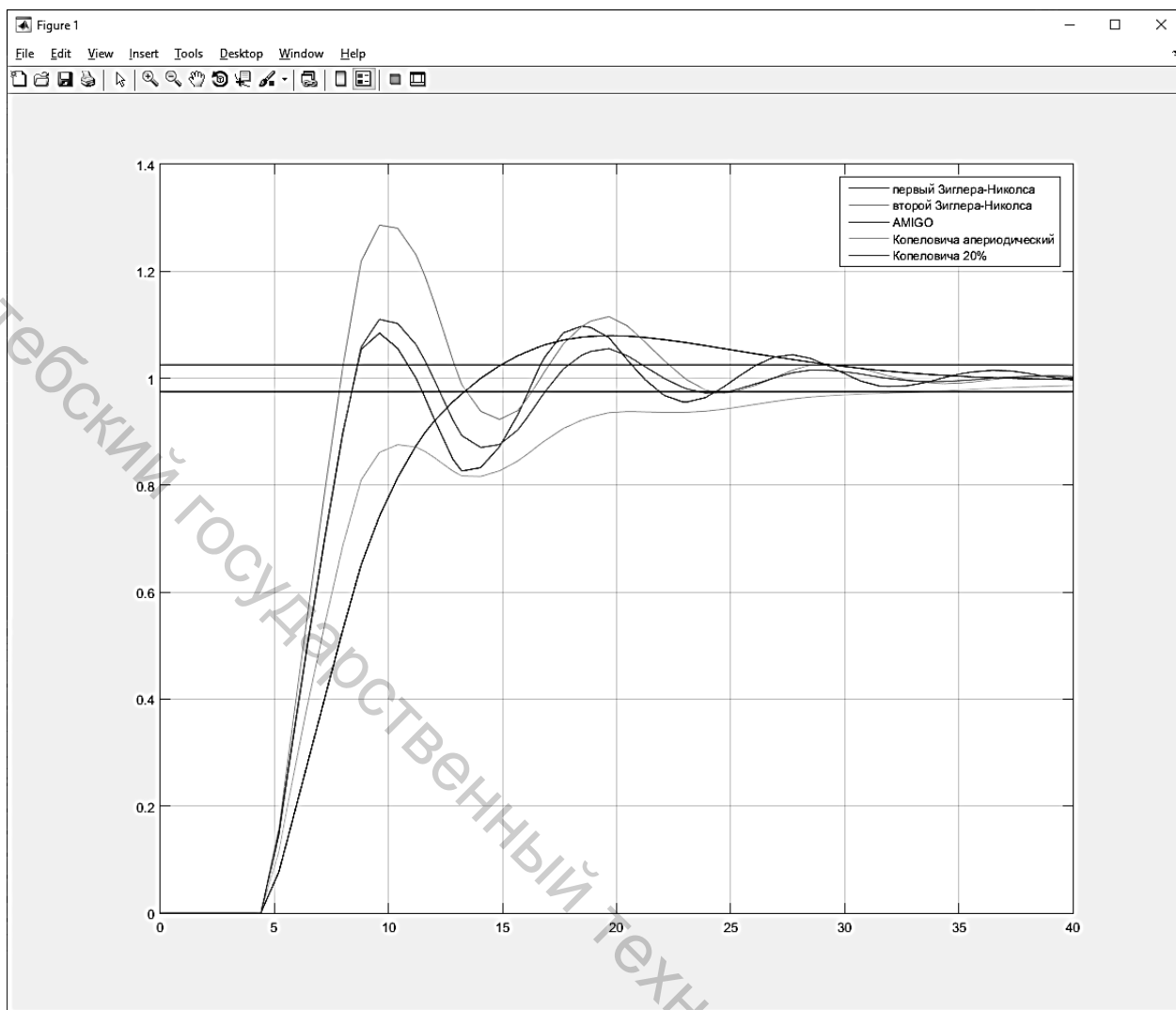


Сохраняем данные моделирования:

```
>> t5=simout.Time;  
>> h5=simout.Data;
```

Построим все графики на одном. Для удобства определения времени регулирования добавим линии, откладывающие $\pm 2,5\%$ от установившегося значения. Для этого в командном окне запишем следующие команды:

```
>>  
plot(t1,h1,'r',t2,h2,'g',t3,h3,'b',t4,h4,'c',t5,h5,'m')  
>> hold on  
>> grid on  
>> legend('первый Зиглера-Николса','второй Зиглера-  
Николса','AMIGO','Копеловича аperiodический','Копеловича  
20%')  
>> plot([0 max(t1)],[0.975 0.975],'k',[0 max(t1)],[1.025  
1.025],'k')
```



Результаты определения показателей качества представим в таблице 8.4.

Таблица 8.4 – Результаты определения показателей качества

Метод	Перерегулирование, %	Время регулирования, с
первый Зиглера-Николса	9	29,2
второй Зиглера-Николса	28	29,7
AMIGO	8	29,4
Копеловича, аperiodический процесс	0	33,5
Копеловича, процесс с перерегулированием 20%	11	24,8

Контрольные вопросы

1. На чем основан первый метод Зиглера – Николса?
2. Как определить критические коэффициенты вторым методом Зиглера – Николса?

3. Параметры настройки ПИД-регулятора методом AMIGO.
4. Для каких процессов используется метод А.П. Копеловича?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9. ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОВОГО ОБЪЕКТА

Цель работы: ознакомление с конструкцией промышленных позиционных регуляторов, изучение принципа действия регулятора. Исследование переходного процесса в двухпозиционной системе регулирования. Оценка качества системы.

Краткие теоретические сведения

Позиционные регуляторы приборного типа являются самыми простыми и широко распространенными. К числу важнейших преимуществ позиционных регуляторов относится возможность получения высокого качества регулирования при применении достаточно простых и надежных технических средств. Они широко применяются при автоматизации тепловых объектов с электрообогревом; насосных и компрессорных установок, в которых требуется ограничение изменения уровня перекачиваемой в резервуар жидкости; стабилизации давления в паропроводах, трубопроводах – подачи сжатого газа; при регулировании частоты вращения двигателей постоянного тока и напряжения генераторов.

В двухпозиционных автоматических системах регулирования (АСР) регулирующий орган (РО) может последовательно занимать два положения (позиции), чему соответствует минимальное или максимальное регулирующее воздействие на объект регулирования. Если в качестве выходного элемента двухпозиционного регулятора используется электромагнитное реле, то это реле в зависимости от текущего значения регулируемой величины будет находиться в процессе регулирования только в 2 состояниях – включенном и выключенном. В результате возникает характерный для рассматриваемого класса АСР периодический процесс изменения регулируемой величины относительно заданного значения – автоколебания.

На рисунке 9.2 приведена структурная схема двухпозиционной АСР и установившиеся автоколебания регулируемой величины.

На этом рисунке:

XЗ – заданное значение регулируемой величины (сигнал, поступающий в регулятор от датчика);

X – истинное значение регулируемой величины (сигнал, поступающий в регулятор с датчика),

$\Delta = X_3 - X$ – сигнал рассогласования, ДР – двухпозиционный регулятор, Z – команда управления (регулирующее воздействие);

$\frac{1}{Tp + 1}$ – передаточная функция объекта,

$e^{-p\tau}$ – передаточная функция датчика. При таком объекте автоколебаний может не быть, если $\tau \rightarrow 0$.

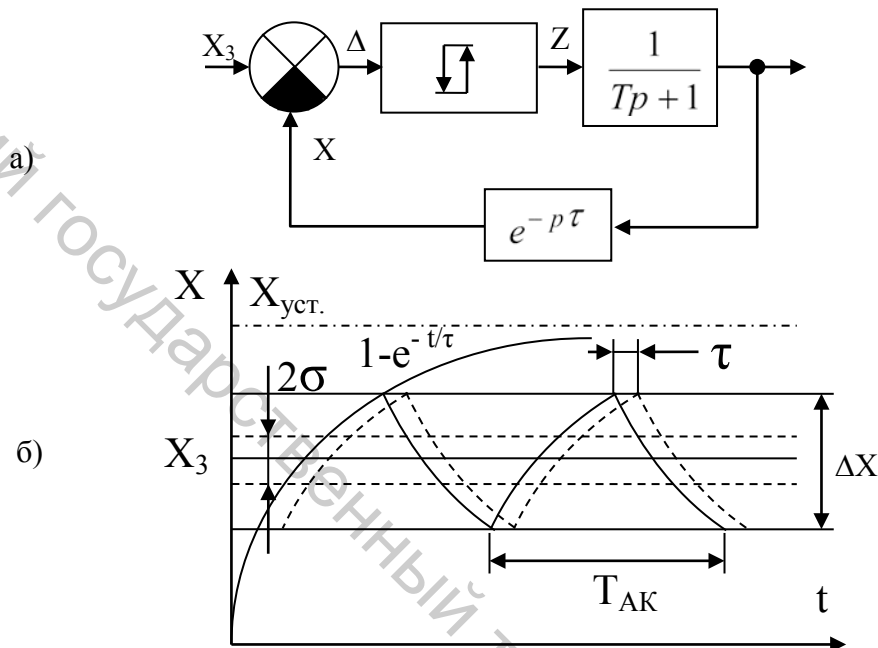


Рисунок 9.1 – Двухпозиционная АСР:
а – структурная схема, б – график переходного процесса

Пример статических характеристик двухпозиционного регулятора приведен на рисунке 9.2.

На рисунке 9.2 а показана статическая характеристика без зоны неоднозначности (идеальная статическая характеристика), на рисунке 9.2 б – с зоной неоднозначности (реальная статическая характеристика).

Для приближенного анализа автоколебаний в системе двухпозиционного регулирования с регулятором, имеющим зону неоднозначности 2Σ и объектом с запаздыванием, у которого $W(p) = \frac{e^{-p\tau}}{Tp + 1}$:

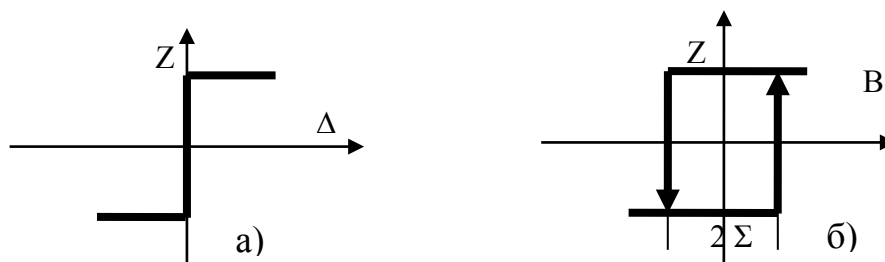


Рисунок 9.2 – Статические характеристики двухпозиционного регулятора:
а – без зоны неоднозначности, б – с зоной неоднозначности

С.М. Смирновым получены формулы, позволяющие рассчитать размах автоколебаний и их период. Относительный (безразмерный) размах автоколебаний

$$2\sigma^* = 2\sigma + \frac{\tau}{T + 0.5\tau}(1 - 2\sigma), \quad (9.1)$$

где 2σ – относительная (безразмерная) зона неоднозначности регулятора; T – постоянная времени объекта регулирования; τ – время запаздывания.

Относительная зона неоднозначности

$$2\sigma = \frac{2\Sigma}{A}, \quad (9.2)$$

где 2Σ – зона неоднозначности регулятора.

Зона регулирования, оцениваемая по разности установившихся значений регулируемой величины при максимальном и минимальном значениях регулирующего воздействия $U_{\max}$ и $U_{\min}$.

$$A = X_{\max} - X_{\min}. \quad (9.3)$$

Размах автоколебаний регулируемой величины

$$\Delta x = 2\sigma^* A. \quad (9.4)$$

Период автоколебаний регулируемой величины

$$T_A = 2\sigma^* T \xi, \quad (9.5)$$

$$\text{где } \xi = \frac{1}{X_3^* (1 - X_3^n)} \quad (9.6)$$

коэффициент, характеризующий расположение автоколебаний в зоне регулирования.

Относительное (безразмерное) задаваемое значение регулируемой величины.

$$X_3^* = \frac{X_3 - X_{\min}}{A}. \quad (9.7)$$

При правильной настройке двухпозиционной АСР установившиеся автоколебания происходят в средней части зоны регулирования. Величина периода автоколебаний в значительной мере сказывается на сроке службы элементов двухпозиционной АСР. При настройке системы на период

автоколебаний можно воздействовать только изменением относительной (безразмерной) зоны неоднозначности, точнее A – зоной регулирования.

$$2\sigma = \frac{2\Sigma}{A}. \quad (9.8)$$

Весьма важным фактором, обуславливающим качество двухпозиционного регулирования, является время запаздывания τ . При наличии запаздывания размах автоколебаний будет тем больше, чем больше 2σ и отношение $\frac{\tau}{T}$, поэтому двухпозиционное регулирование рекомендуется применять лишь для регулирования объектов с большими постоянными времени T и малым временем τ , при этом соотношение $\frac{\tau}{T}$ должно быть не более 0,2.

Порядок выполнения работы

1. Смоделировать с использованием ЭВМ (программа Sam Sim) систему автоматического регулирования (управления) двухпозиционного регулирования (рис. 9.3).

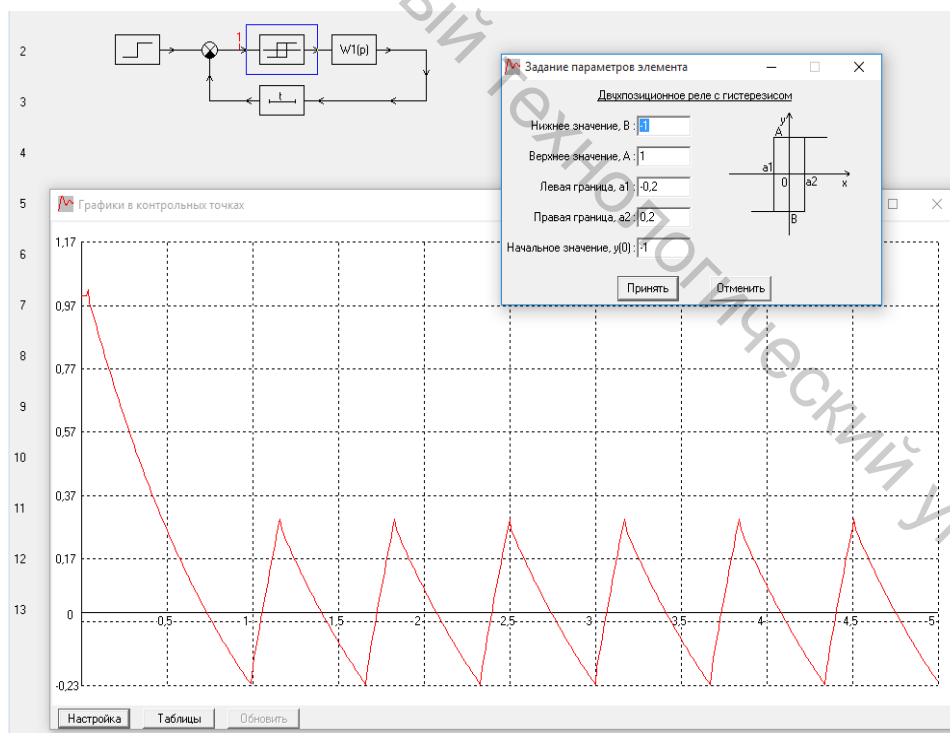


Рисунок 9.3 – Модель системы автоматического двухпозиционного регулирования

2. Разработать схему, в которой аналоговый сигнал датчика температуры преобразуется в сигнал, который при допустимых значениях температуры имеет значение «0», а при превышении температуры значение «1» (рис. 9.4).

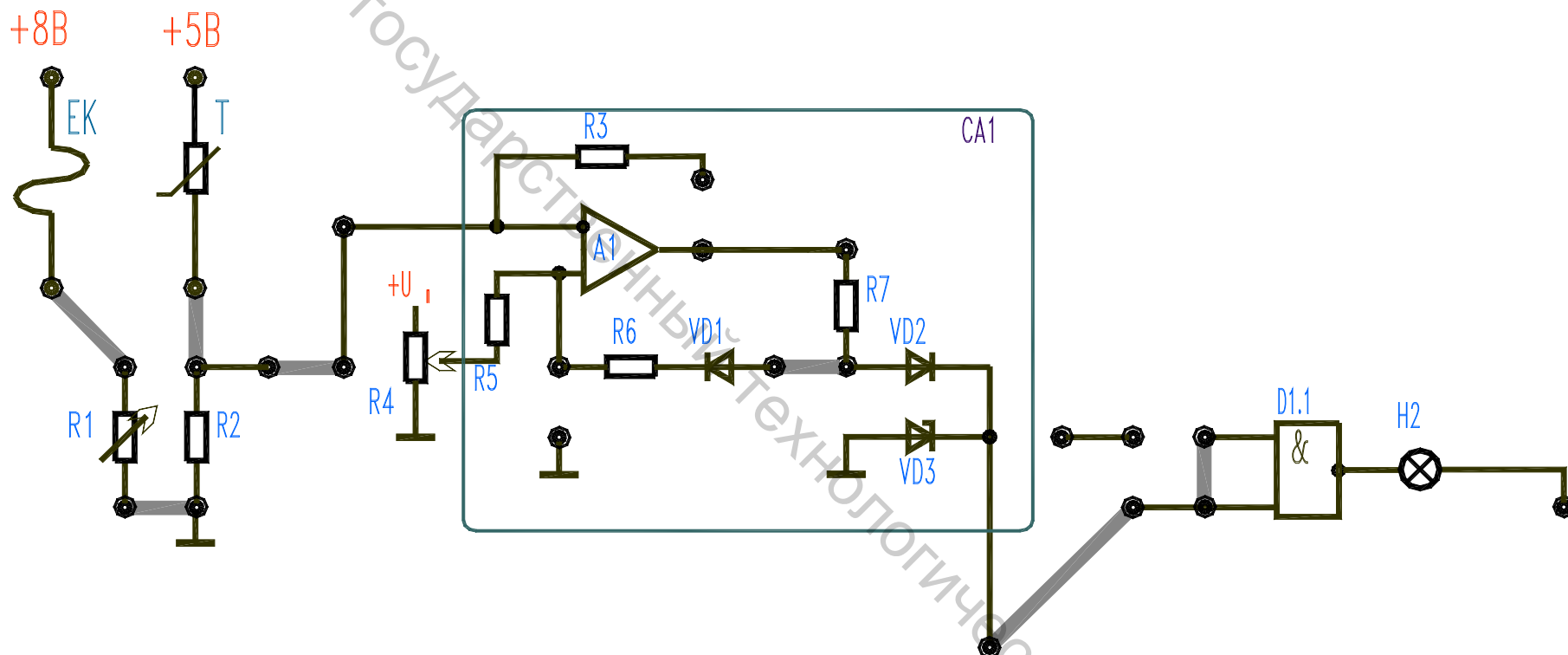


Рисунок 9.4 – Базовая схема регулирования температуры на наборном поле стенда

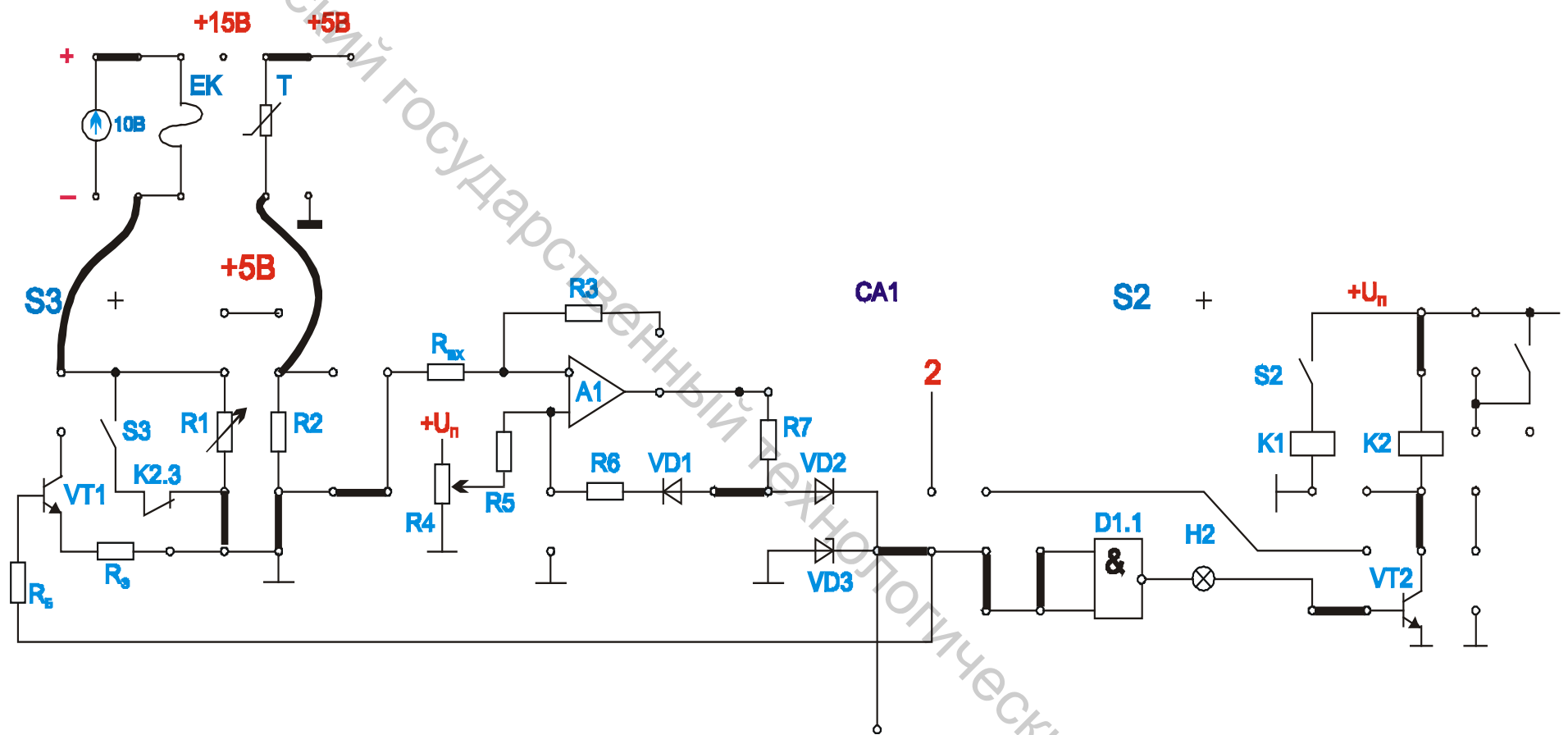


Рисунок 9.5 – Схема для позиционного регулирования температуры на наборном поле стенда

3. Дополнить схему таким образом, чтобы нагрев автоматически отключался или уменьшался при достижении верхней предельной температуры. Обратную связь осуществить с помощью транзистора VT1 либо с помощью реле K2 (рис. 9.6).

4. Представить схему потока сигналов в обоих случаях.

5. Для ускорения протекающих процессов в схеме рекомендуется включать нагревательный элемент ЕК, минуя резистор R1.

6. Записать 4–6 периодов установившихся автоколебаний и определить 2σ , которые определяются по включению и выключению сигнальной лампочки в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 – Периоды установившихся автоколебаний

Температура		$2\sigma, ^\circ\text{C}$
ВКЛ	ОТКЛ	

7. По полученному графику определить $T, \tau, X_{\max}, X_{\min}$, среднее значение размаха автоколебаний ΔX , и периода автоколебаний $T_{a.э.}$.

8. Аналитически рассчитать значения ΔX_p и $T_{a.p.}$, сравнить их с экспериментальными.

9. Данные занести в таблицу 9.2.

Таблица 9.2 – Параметры двухпозиционной АСР

$A_{зр}$	2σ	$2\sigma^*$	ΔX_p	$T_{a.p.}, \text{мин}$	$\Delta X_{э}$	$T_{a.э.}, \text{мин}$

Контрольные вопросы

1. Что такое двухпозиционное регулирование?
2. Что такое функциональная и структурная схемы для позиционного регулирования температуры.
3. Какими параметрами характеризуется переходный процесс для двухпозиционных САР, как они определяются?
4. Пояснить процесс регулирования САР температуры по электрической схеме лабораторной установки.
5. Дать качественную оценку процесса регулирования температуры.

ЛАБОРНАЯ РАБОТА 10. УСТОЙЧИВОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ САУ

Краткие теоретические сведения

Устойчивость – способность системы возвращаться в исходное состояние равновесия после приложения и снятия воздействия, которое вывело ее из этого состояния.

Система автоматического регулирования может быть спроектирована таким образом, что в независимости от комплекса этих значений система может быть неустойчивой, в этом случае она называется структурно-неустойчивой. Чтобы добиться ее устойчивости, необходимо поменять всю ее структуру.

Структурно-устойчивой является система, в которой добиться устойчивости можно, изменяя параметры K и T , не изменяя при этом структуру системы.

Для определения устойчивости необходимо получить характеристическое уравнение системы. Для этого необходимо записать передаточную функцию системы в замкнутом состоянии и приравнять ее знаменатель к нулю. Также характеристическое уравнение можно получить приравняв к нулю сумму числителя и знаменателя передаточной функции системы в разомкнутом состоянии.

Характеристическое уравнение линейной САУ можно представить в виде:

$$D(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0. \quad (10.1)$$

Гурвиц разработал алгебраический критерий устойчивости в форме определителей, составляемый из коэффициентов характеристического уравнения системы.

Он формулируется следующим образом: для того, чтобы система автоматического управления была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения и определители Гурвица до $(n-1)$ -го порядка включительно были положительны.

Матрицу Гурвица строят из коэффициентов характеристического уравнения по следующему правилу: по главной диагонали определителя слева направо выписывают все коэффициенты характеристического уравнения от a_{n-1} до a_0 в порядке убывания индексов. Столбцы вверх от главной диагонали дополняют коэффициентами характеристического уравнения с последовательно убывающими индексами, а столбцы вниз – коэффициентами с последовательно возрастающими индексами. На место коэффициентов с индексами больше n и меньше нуля проставляют нули.

Отчеркивая в главном определителе Гурвица диагональные миноры, получим определители Гурвица низшего порядка Δ_i .

$$\begin{array}{c|ccccccc} \Delta_1 & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \Delta_2 & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \Delta_3 & 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_2 & a_0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_3 & a_1 & 0 \\ \Delta_n & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_4 & a_2 & a_0 \end{array}$$

Рисунок 10.1 – Матрица Гурвица и ее определители

По критерию Гурвица можно определить критическое значение параметра, при котором система находится на границе устойчивости. Для этого необходимо старший из определителей, содержащих данный параметр, приравнять к 0 и решить полученное уравнение.

Пример решения. Используя критерий Гурвица, определить устойчивость и критический коэффициент усиления системы, структурная схема которой представлена на рисунке 10.2. Параметры системы: $K_1 = 25$, $K_2 = 2$, $K_3 = 1$, $T_1 = 0,01с$, $T_2 = 0,1с$, $T_3 = 0,5с$.

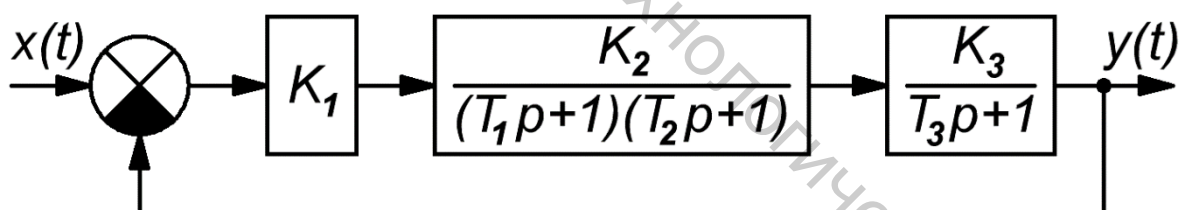


Рисунок 10.2 – Структурная схема исследуемой системы

Передаточная функция системы в разомкнутом состоянии:

$$W_{раз}(p) = \frac{K_1 K_2 K_3}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}. \quad (10.2)$$

Находим характеристическое уравнение согласно формуле (10.2):

$$D(p) = p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) + K_1 K_2 K_3 = 0; \quad (10.3)$$

$$T_1 T_2 T_3 p^4 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) p^3 + (T_1 + T_2 + T_3) p^2 + p + K_1 K_2 K_3 = 0; \quad (10.4)$$

$$a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0.$$

Найдем значения коэффициентов характеристического уравнения:

$$\begin{aligned} a_4 &= T_1 T_2 T_3 = 0,01 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 0,0005; \\ a_3 &= T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3 = 0,01 \cdot 0,1 + 0,01 \cdot 0,5 + 0,1 \cdot 0,5 = 0,056; \\ a_2 &= T_1 + T_2 + T_3 = 0,01 + 0,1 + 0,5 = 0,61; \\ a_1 &= 1; \\ a_0 &= K_1 K_2 K_3 = 25 \cdot 2 \cdot 1 = 50. \end{aligned}$$

Все коэффициенты характеристического уравнения положительны, следовательно, необходимое условие устойчивости выполняется.

Составляем главный определитель Гурвица:

$$\begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_4 & a_2 & a_0 \end{vmatrix}. \quad (10.5)$$

Найдем значения определителей Гурвица до $(n-1)$ -го порядка включительно, т.е. до третьего порядка:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= a_3 = 0,056 > 0; \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ a_4 & a_2 \end{vmatrix} = a_3 a_2 - a_4 a_1 = 0,056 \cdot 0,61 - 0,0005 \cdot 1 = 0,03366 > 0; \\ \Delta_3 &= \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_3 a_2 a_1 - a_4 a_1^2 - a_0 a_3^2 = 0,056 \cdot 0,61 \cdot 1 - 0,0005 \cdot 1^2 - 50 \cdot 0,056^2 = -0,12314 < 0. \end{aligned}$$

Так как определитель $\Delta_3 < 0$, то система **неустойчива**.

Найдем критическое значение коэффициента усиления системы.

Коэффициент усиления системы входит в коэффициент характеристического уравнения a_0 . Данный коэффициент входит в определитель Δ_3 . Приравняем этот определитель к 0:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_3 a_2 a_1 - a_4 a_1^2 - a_0 a_3^2 = 0.$$

Решим полученное уравнение относительно a_0 :

$$K_{KP} = a_0 = \frac{a_1(a_3a_2 - a_4a_1)}{a_3^2} = \frac{1 \cdot (0,056 \cdot 0,61 - 0,0005 \cdot 1)}{0,056^2} = 10,73.$$

Таким образом, критическое значение коэффициента усиления системы равно 10,73.

Порядок выполнения работы

1. Определить устойчивость системы, используя критерии устойчивости Гурвица. Определить критический коэффициент усиления.

Структурные схемы систем изображены на рисунках 10.3–10.5. Параметры систем для различных вариантов представлены в таблице 10.1.

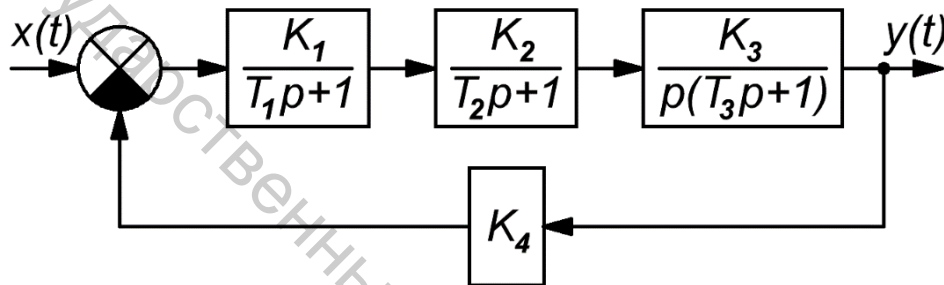


Рисунок 10.3 – Схема № 1

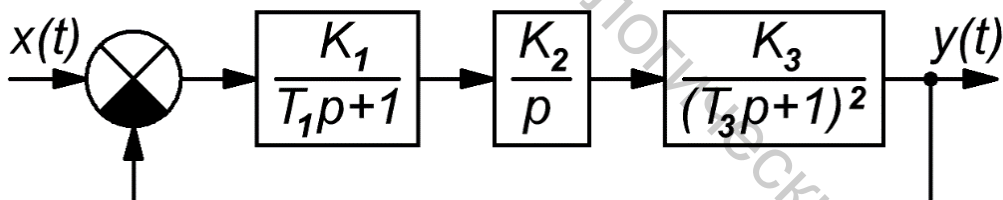


Рисунок 10.4 – Схема № 2

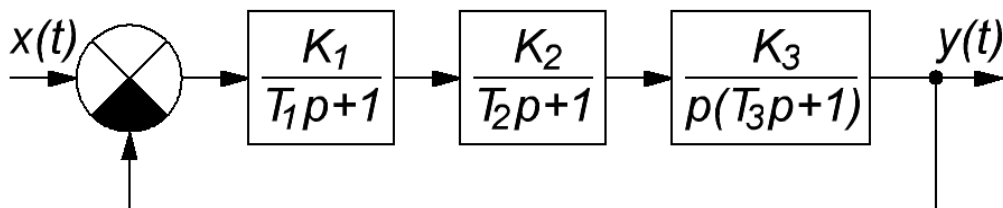


Рисунок 10.5 – Схема № 3

Таблица 10.1 – Варианты заданий

№ варианта	№ схемы	Параметры						
		K_1	K_2	K_3	K_4	T_1	T_2	T_3
1	1	2	1,25	1	0,5	0,05	0,5	2
2	2	4	1,25	0,5		0,01		0,5
3	3	5	1	0,4		0,05	0,1	2
4	1	10	2,5	1	2,5	1	0,5	0,25
5	2	10	4	1		1		0,25
6	3	16	2	1		0,2	0,04	1
7	1	4	1	0,8	1,25	0,02	0,25	0,5
8	2	8	1	0,5		0,5		0,05
9	3	8	1	0,5		0,16	0,02	2,5
10	1	5	1,25	1	0,5	0,2	1	4
11	2	5	1	0,4		0,08		2
12	3	10	2	1		1	5	0,2
13	1	8	1	0,5	0,8	0,04	0,25	1
14	2	4	2	1		0,1		0,02
15	3	4	1	1		0,2	4	0,01

2. Выполнить компьютерное моделирование рассматриваемой системы (программа SamSim).

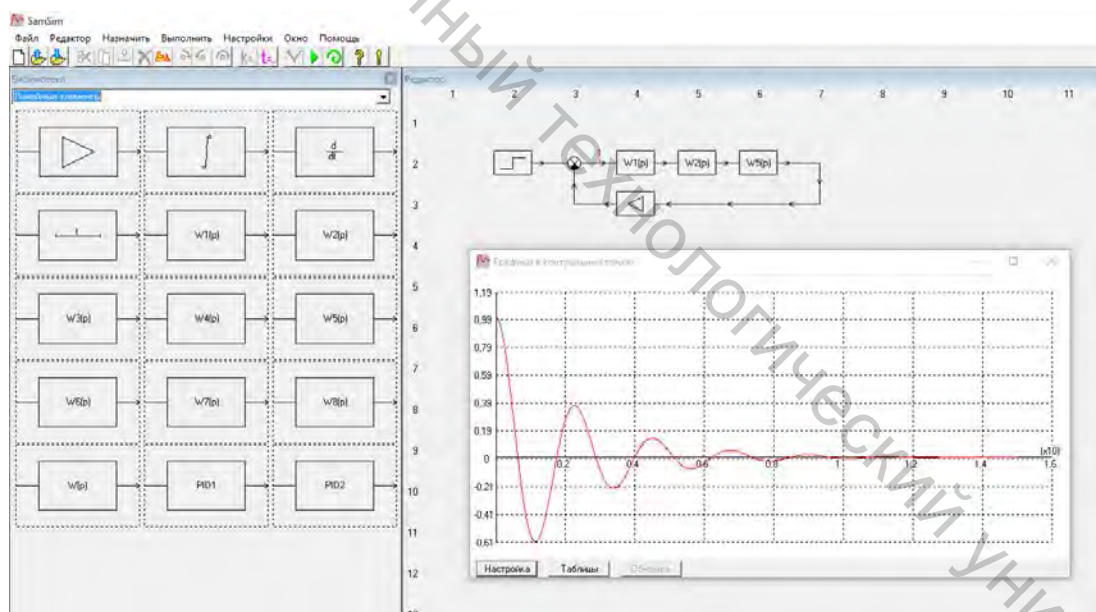


Рисунок 10.6 – Пример моделирования САУ промышленным объектом

3. Сделать выводы о соответствии результатов расчетов моделированию.

Контрольные вопросы

1. Что подразумевается под устойчивостью системы.
2. Дать определение критерия устойчивости по Гурвицу.
3. Какая система является структурно устойчивой.
4. Какая система является структурно неустойчивой.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ

Цель работы: экспериментальное исследование основных электрических и временных параметров электромагнитных реле и методов их изменения.

Краткие теоретические сведения

Электромагнитные реле предназначены для коммутации электрических цепей устройств электроавтоматики. Различают реле постоянного тока и переменного тока. На рисунке 11.1 показано устройство реле постоянного тока, где отмечены – корпус 1, сердечник 2, обмотка 3, якорь 4, штифт отлипания 5, контактные пружины 6, возвратная пружина 7.

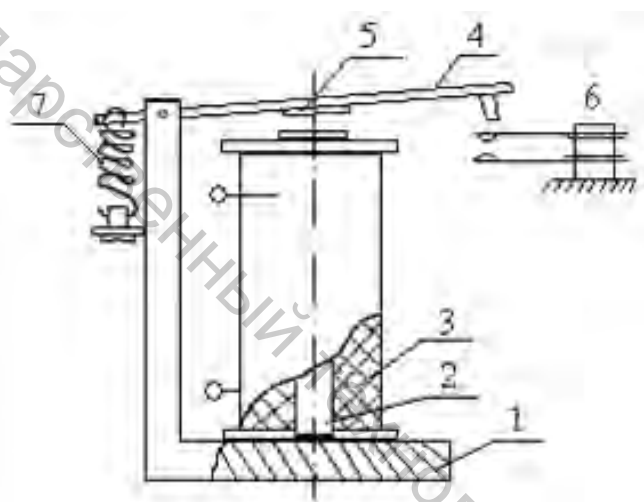


Рисунок 11.1 – Реле постоянного тока

При прохождении по обмотке тока возбуждается магнитный поток, который, проходя по магнитопроводу, замыкается через воздушный зазор. В этом случае якорь притягивается к сердечнику, что приводит к замыканию или размыканию соответствующих контактов.

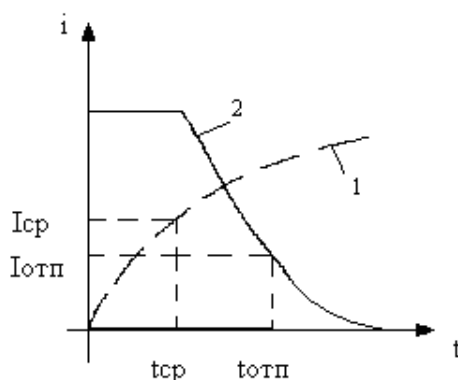


Рисунок 11.2 – График переходного процесса работы реле постоянного тока

Наиболее важными параметрами электромагнитных реле являются: токи срабатывания I_{cp} и отпускания I_{omn} , коэффициент запаса $K_z = \frac{I}{I_{cp}}$, коэффициент возврата $K_v = \frac{I_{omn}}{I_{cp}}$, время срабатывания t_{cp} и время отпускания t_{omn} . На рисунке 11.2 показаны закономерности изменения тока в обмотке реле при его включении (кривая 1) и выключении (кривая 2).

Методы ускорения срабатывания реле

1. Метод форсированного включения реле.

Этот метод заключается в увеличении напряжения, прикладываемого к обмотке реле. В этом случае возрастает скорость изменения тока в обмотке реле, растет коэффициент запаса, уменьшается время срабатывания реле. Увеличение напряжения ограничивается условиями нагрева обмотки реле.

2. Форсировка дешунтированием добавочного сопротивления.

На период включения на схему подается $U > U_{ном}$. После срабатывания реле его замыкающими контактами вводится R_d , ограничивающее ток до номинального.

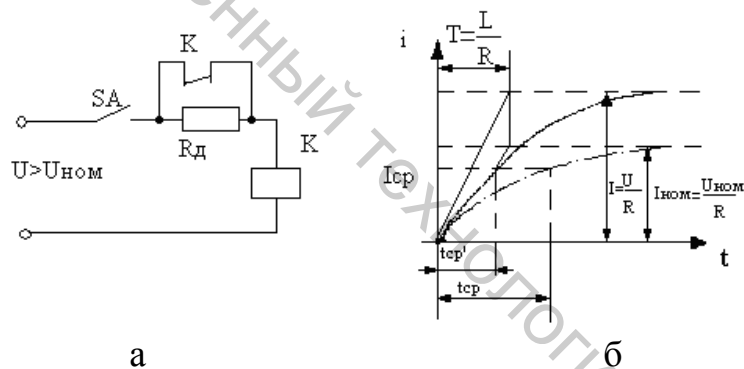


Рисунок 11.3 – Форсировка дешунтированием добавочного сопротивления:
а – схема включения; б – график переходного процесса

3. Форсировка шунтированием R_d емкостью.

В момент включения схемы под напряжение C_d заряжается и создает дополнительный путь для тока, шунтируя R_d . После полной зарядки C_d ток реле ограничивается R_d .

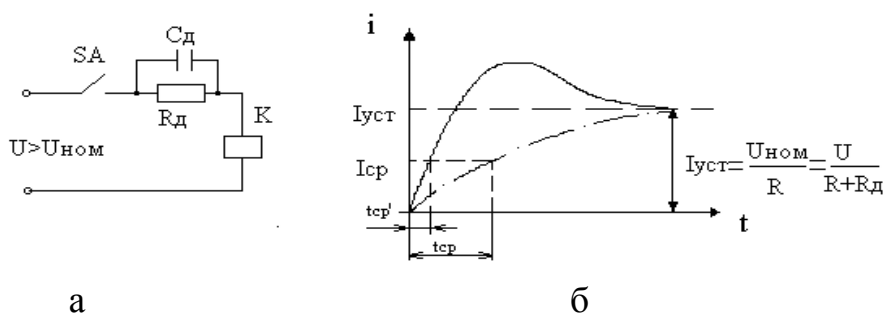


Рисунок 11.4 – Форсировка шунтированием R_d емкостью:
а – схема включения; б – график переходного процесса

4. Ускорение срабатывания реле путем уменьшения постоянного времени цепи обмотки.

Постоянная времени цепи обмотки реле, определяющая скорость изменения тока, равна $T = \frac{L}{R}$, где L – индуктивность обмотки, R – сопротивление обмотки. Уменьшение T достигается последовательным включением R_d в цепь обмотки $T' = \frac{L}{R + R_d}$.

Величина R_d определяется условиями необходимого ускорения, а напряжения питания схемы – из условия $I_{уст} = I_{ном}$.

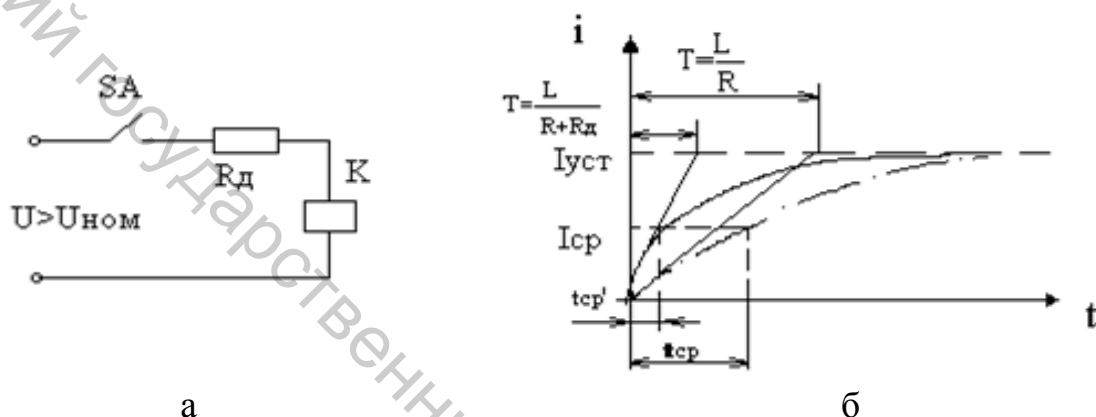


Рисунок 11.5 – Ускорение срабатывания реле путем уменьшения постоянной времени цепи обмотки:

а – схема включения; б – график переходного процесса

Методы замедления срабатывания реле

1. Замедление с помощью RC-цепи.

В этой схеме напряжение на обмотке реле, равное напряжению на $C_{ш}$, нарастает постепенно по мере заряда емкости. Время заряда пропорционально произведению $R_d C_{ш}$. Напряжение питания выбирают из условия $I_{уст} = I_{ном}$.

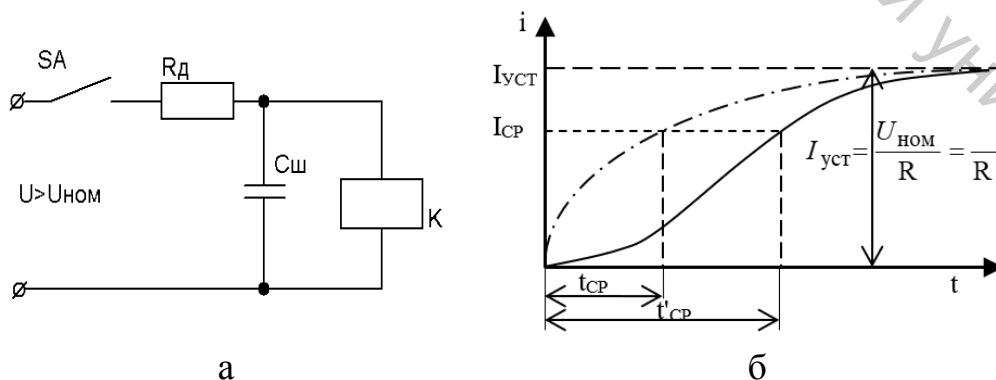


Рисунок 11.6 – Замедление с помощью RC-цепи:
а – схема включения; б – график переходного процесса

2. Замедление с помощью добавочного и шунтирующего сопротивлений.

Иногда в схемах автоматических и телемеханических устройств используются реле с номинальным напряжением, меньшим напряжения питания схемы, и для ограничения тока в обмотке включают R_d , что приводит к ускорению срабатывания реле. Для снижения быстродействия реле до номинальной величины обмотку шунтируют $R_{ш}$.

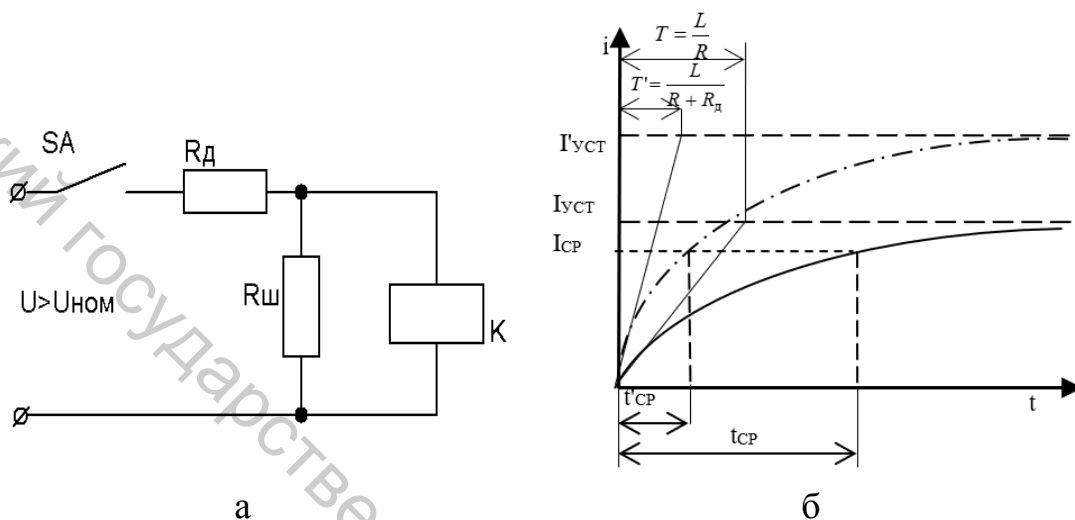


Рисунок 11.7 – Замедление с помощью добавочного и шунтирующего сопротивлений:

а – схема включения; б – график переходного процесса

Методы замедления отпускаания реле

1. Замедления с помощью шунтирующего сопротивления.

Этот метод рассмотрен ранее. Его недостаток – дополнительные потери энергии в $R_{ш}$. Для уменьшения потерь электроэнергии обмотку реле шунтируют диодом (рис. 11.8). В этом случае при отключении реле в контуре реле – диод приобретает ток самоиндукции в направлении прямой проводимости диода и обмотка шунтируется его малым прямым сопротивлением.

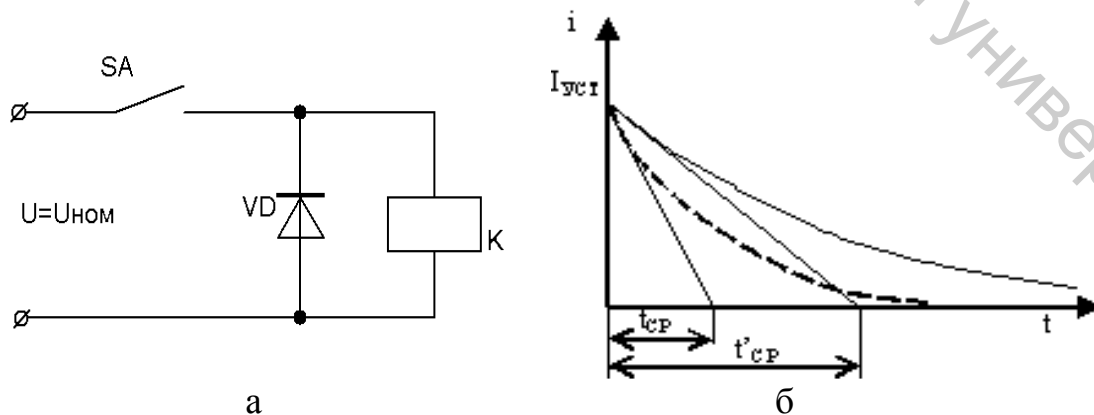


Рисунок 11.8 – Замедление с помощью шунтирующего диода VD:

а – схема включения; б – график переходного процесса

2. Замедление шунтированием обмотки реле емкостью.

Схема (рис. 11.6) создает замедление не только при включении, но и при отключении. При отключении напряжения емкость $C_{ш}$ разряжается на обмотку реле и обеспечивает замедление спада тока по сравнению с простым отключением. Графики переходных процессов приведены на рисунке 11.9.

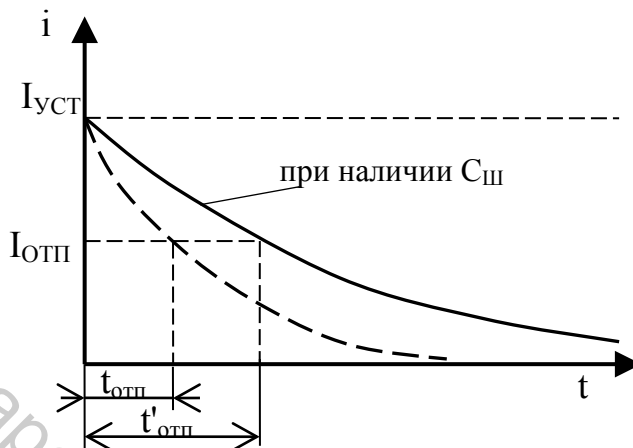


Рисунок 11.9 – Замедление отпускания реле с помощью RC-цепи.
График переходного процесса

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рис. 11.10). Определить напряжение и ток срабатывания реле. Определить напряжение и ток отпускания реле.

Примечание: $U_{ном}$ принято равным 24В, а $I_{ном}=1,35мА$.

2. По данным п.1. определить $K_v = \frac{I_{отп}}{I_{ср}}$ и $K_z = \frac{I_{ном}}{I_{ср}}$.

3. Собрать схему, представленную на рисунке 11.10. Определить $t_{ср}$ реле для указанных в таблице 11.1 напряжений.

Таблица 11.1 – $t_{ср}$ реле при различных напряжениях

$U, В$	5	24	30	40
$\frac{U}{U_{ср}}$				
$t_{ср}, мс$				

4. Собрать схему, представленную на рисунке 11.11. Определить $t_{отп}$ реле для указанных в таблице 11.2 напряжений. Подключить в соответствии с рисунком 11.8 диод и для $U = U_{ном}$ определить время отпускания реле.

Таблица 11.2 – t_{omn} реле различных напряжений

$U, В$	5	24	30	40
$\frac{U}{U_{отп}}$				
$t_{omn}, мс$				

5. Собрать схему (рис. 11.12) и определить зависимость времени срабатывания реле от величины R_{∂} . При изменении R_{∂} устанавливать ток в обмотке реле $I_p = I_{ном} = 1,35 мА$ изменением напряжения источника питания. Данные занести в таблицу 11.3.

Таблица 11.3 – Зависимость времени срабатывания реле от величины R_{∂}

$R_{\partial}, кОм$	0	6,8	16	24	110
$t_{cp}, мс$					

6. Собрать схему (рис. 11.13) и определить зависимость времени срабатывания реле от величины R_{∂} и C_{∂} . При изменении R_{∂} устанавливать ток в обмотке реле $I_p = I_{ном} = 1,35 мА$ изменением напряжения источника питания. Данные занести в таблицу 11.4.

Таблица 11.4 – Зависимость времени срабатывания реле от величины R_{∂} и C_{∂}

C_{∂} $R_{\partial}, кОм \backslash C_{\partial}, мкФ$	20	200	1000
110	$t_{cp}, мс$		
220			

7. Собрать схему (рис. 11.14) и определить зависимость времени срабатывания реле от величины R_{∂} и $C_{ш}$ при $I_p = I_{ном} = 1,35 мА$. Данные занести в таблицу 11.5.

Таблица 11.5 – Зависимость времени срабатывания реле от величины R_{∂} и $C_{ш}$

$C_{ш}$ $R_{\partial}, кОм \backslash C_{\partial}, мкФ$	20	200	1000
6,8	$t_{cp}, мс$		
110			

8. Собрать схему (рис. 11.15) и определить зависимость времени отпускания реле от $C_{ш}$ при $I_p = I_{ном} = 1,35 мА$. Установить $R_{\partial} = 16,0 кОм$ для всех значений $C_{ш}$. Данные занести в таблицу 13.6.

Таблица 11.6 – зависимость времени отпускания реле от $C_{ш}$

$C_{ш}, мкФ$	20	200
$t_{отп}, мс$		

9. Собрать схему (рис. 11.16) и определить зависимость времени срабатывания реле от величин R_{∂} и $R_{ш}$ при $I_p = I_{ном} = 1,35 мА$. Данные занести в таблицу 11.7.

Таблица 11.7 – Зависимость времени срабатывания реле от величин R_{∂} и $R_{ш}$

$R_{ш}, кОм$ \ $R_{\partial}, кОм$	6,8	16
6,8		
1,5		

10. Собрать схему (рис. 11.17) и определить зависимость времени отпускания реле от величины $R_{ш}$ при $R_{\partial} = 16 кОм$ и $I_p = I_{ном} = 1,35 мА$. Данные занести в таблицу 11.8.

Таблица 11.8 – Зависимость времени отпускания реле от величины $R_{ш}$

$R_{ш}, кОм$	∞	6,8	1,5
$t_{отп}, мс$			

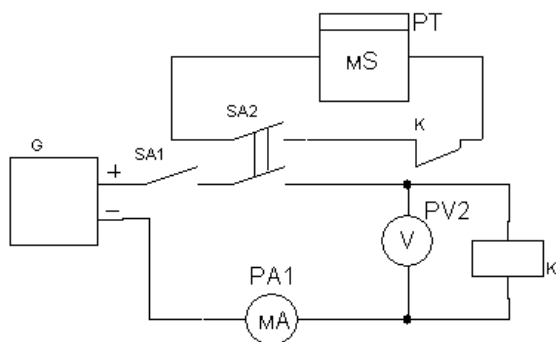


Рисунок 11.10 – Схема для определения времени срабатывания реле

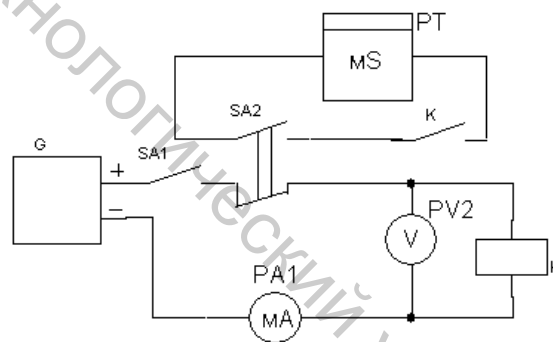


Рисунок 11.11 – Схема для определения времени размыкания реле

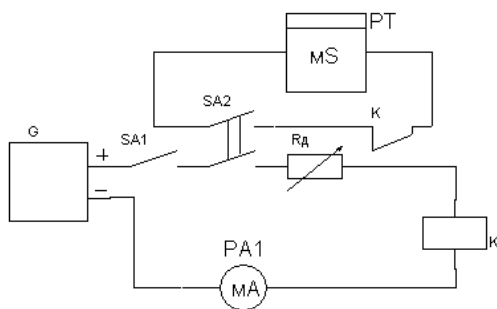


Рисунок 11.12 – Схема с добавочным сопротивлением (срабатывание)

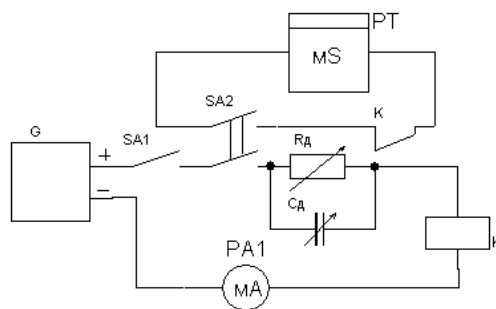


Рисунок 11.13 – Схема с форсирующей цепью (срабатывание)

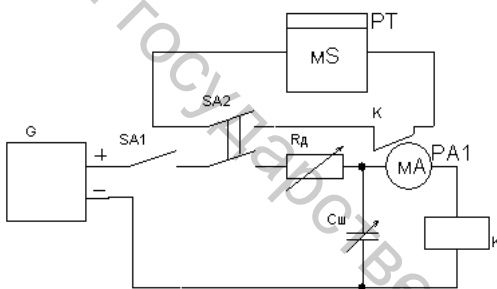


Рисунок 11.14 – Схема с интегрирующей цепью (срабатывание)

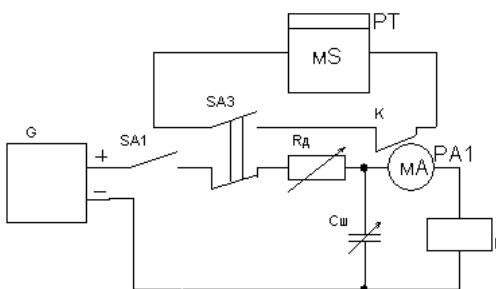


Рисунок 11.15 – Схема с интегрирующей цепью (размыкание)

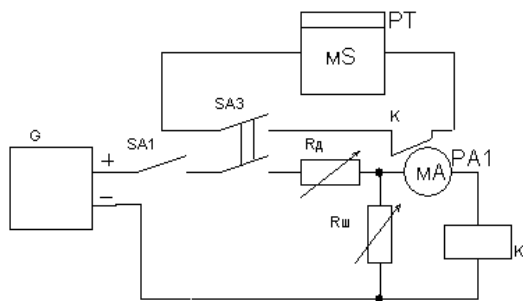


Рисунок 11.16 – Схема с делителем напряжения (срабатывание)

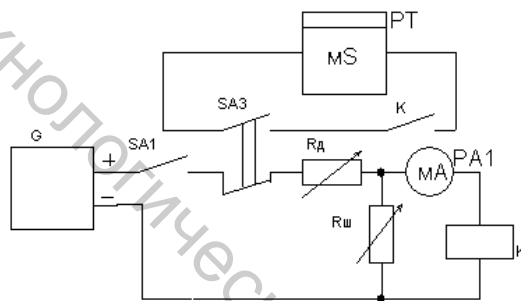


Рисунок 11.17 – Схема с делителем напряжения (размыкание)

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип действия и назначения элементов конструкции реле.
2. Дать определения времени срабатывания и времени отпускания реле.
3. Привести схемы и объяснить методы ускорения срабатывания реле.
4. Привести схемы и объяснить методы замедления срабатывания реле.
5. Привести схемы и методы замедления отпускания реле.
6. Привести блок-схему и объяснить принцип действия электросекундомера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров, В. И. Теплотехнические измерения и приборы : учебное пособие / В. И. Назаров. – Минск : Изд-во Вышэйшая школа, 2017. – 280 с.
2. Назаров, В. И. Теория автоматического регулирования теплоэнергетических процессов. Практикум : учебное пособие / В. И. Назаров. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 215 с.
3. Рачков, М. Ю. Физические основы измерений : учебное пособие для академического бакалавриата / М. Ю. Рачков. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2019. – 146 с.
4. Шойко, В. П. Автоматическое регулирование в электрических системах : учебное пособие / В. П. Шойко ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. – 2-е изд. – Новосибирск : НГТУ, 2018. – 195 с.

Учебное издание

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Лабораторный практикум

Составители:

Клименкова Светлана Александровна

Самусев Артем Михайлович

Черненко Дмитрий Владимирович

Редактор *Т.А. Осипова*

Корректор *Т.А. Осипова*

Компьютерная верстка *С.А. Клименкова*

Подписано к печати 14.06.2022. Формат 60х90¹/₁₆. Усл. печ. листов 4,6.
Уч.-изд. листов 6,1. Тираж 50 экз. Заказ № 168.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.