

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. Г. Сеньков, Н. М. Матвейчук, Е. Е. Мясинник

## АВТОМАТИКА. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по аграрному  
техническому образованию в качестве учебно-методического  
пособия для студентов учреждений высшего образования  
по специальности 1-74 06 05 Энергетическое обеспечение  
сельского хозяйства (по направлениям)*

Минск  
БГАТУ  
2017

УДК 681.5(07)  
ББК 32.965я7  
С31

Рецензенты:

заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов  
и электротехники УО «Белорусский государственный аграрно-технический  
университет» кандидат технических наук *С. Д. Карпович*,  
заведующий лабораторией РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации  
сельского хозяйства» кандидат технических наук, доцент *В. В. Чумаков*

**Сеньков, А. Г.**  
С31 Автоматика. Лабораторный практикум : учебно-методическое пособие /  
А. Г. Сеньков, Н. М. Матвейчук, Е. Е. Мясинник. – Минск : БГАТУ, 2017. –  
204 с.  
ISBN 978-985-519-868-1.

Приведен теоретический материал по математическому описанию звеньев  
и систем автоматического управления, синтезу непрерывных и дискретных систем  
автоматического регулирования, программно-техническим и микропроцессорным  
средствам автоматизации технологических процессов. Большое внимание уделено  
компьютерному моделированию работы систем автоматического управления  
и изучению принципов программирования контроллеров для управления  
технологическими процессами.

Предназначен для подготовки к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Автоматика» студентов специальности 1-74 06 05 Энергетическое обеспечение  
сельскохозяйственного производства (по направлениям) всех форм обучения.

УДК 681.5(07)  
ББК 32.965я7

ISBN 978-985-519-868-1

© БГАТУ, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>МОДУЛЬ 1.</b> Основы теории автоматического регулирования и управления .....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Исследование линейных звеньев и получение их статических и частотных характеристик .....	50
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Моделирование статических и частотных характеристик линейных звеньев.....	55
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Линеаризация гладких нелинейных характеристик звеньев систем автоматизации .....	68
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Идентификация объектов управления и средств автоматизации .....	71
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Исследование систем с пропорциональным законом (п-законом) регулирования .....	85
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. Исследование систем с интегральным законом (и-законом) регулирования.....	97
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. Синтез систем автоматического регулирования .....	104
<b>МОДУЛЬ 2.</b> Программно-технические средства автоматизации. Микропроцессорные устройства управления в системах автоматизации .....	112
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. Исследование двухпозиционных регуляторов и систем .....	160
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9. Исследование трехпозиционных регуляторов и систем .....	172
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10. Исследование потенциометрических датчиков.....	179
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11. Исследование индуктивных и индукционных датчиков.....	185
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12. Изучение принципов программирования контроллеров для управления технологическими процессами и основ алгоритмического языка structured control language .....	189
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13. Разработка программного обеспечения с реализацией стандартных функций таймера .....	199
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	203

## ВВЕДЕНИЕ

Автоматика – научная дисциплина, предметом изучения которой являются информационные процессы, протекающие в системах управления техническими и технологическими объектами. Автоматика выявляет общие закономерности функционирования, присущие автоматическим системам различной физической природы, и на основе этих закономерностей разрабатывает принципы построения высококачественных систем автоматического управления (САУ).

Лабораторный практикум содержит теоретический материал по математическому описанию звеньев и систем автоматического управления, синтезу непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования, программно-техническим и микропроцессорным средствам автоматизации технологических процессов и методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Автоматика».

Целью выполнения лабораторных работ является изучение математического описания и характеристик звеньев систем автоматического управления, свойств и методов синтеза систем автоматического регулирования с типовыми линейными законами регулирования с использованием широко распространенной системы компьютерной математики MATLAB и входящего в ее состав пакета блочного моделирования динамических систем Simulink (модуль 1), изучение принципов действия и характеристик технических средств автоматизации на примере позиционных регуляторов, потенциометрических, индуктивных и индукционных датчиков, структуры микропроцессорной системы управления и приобретение навыков создания проекта автоматизации (модуль 2).

Значительная часть лабораторного практикума посвящена компьютерному моделированию работы систем автоматического управления и изучению принципов программирования контроллеров для управления технологическими процессами.

## МОДУЛЬ 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

### Краткие теоретические сведения

#### Математическое описание системы

Для исследования работы любой системы автоматического управления (САУ) необходимо иметь ее математическое описание (математическую модель).

**Математическое описание системы** начинается с разбиения ее на отдельные элементы (*звенья*) направленного действия, в каждом из которых сигнал со входа передается на выход, при этом выполняется определенное преобразование передаваемого сигнала. В качестве *примера* рассмотрим систему автоматического регулирования (САР) температуры в помещении, упрощенное схематическое изображение которой приведено на рис. 1 [3].

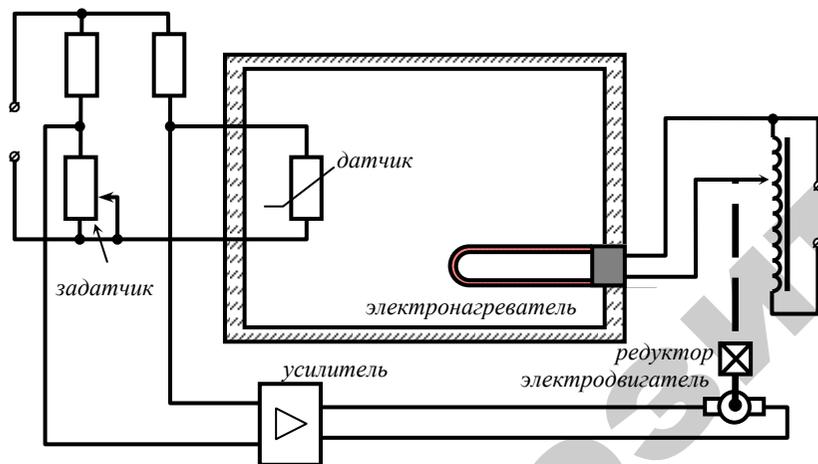


Рис. 1. Упрощенное схематическое изображение системы автоматического регулирования температуры в помещении

**Объектом управления** данной САР является помещение. **Управляемая величина** – температура воздуха  $\theta$  в помещении. Для ее измерения в помещении имеется **датчик** (термосопротивление),

преобразующий изменение температуры  $\theta$  в изменение сопротивления  $R_d$ . Для задания требуемого значения температуры  $\theta_3$  (заданное значение температуры), которое необходимо поддерживать в помещении, служит переменное сопротивление  $R_1$ . **Устройство сравнения**, выполненное на основе резистивной мостовой схемы из четырех сопротивлений  $R_1, R_2, R_3, R_d$ , предназначено для сравнения температуры в помещении с заданной температурой и формирования электрического сигнала рассогласования (сигнала ошибки) – напряжения, пропорционального разности:

$$U_M \sim \theta_3 - \theta.$$

Для обогрева воздуха в помещении установлен электронагреватель. **Управляющим воздействием** в данном случае является электрическая мощность электронагревателя  $P$ , которая может изменяться с помощью подвижного контакта автотрансформатора, перемещением которого управляет электродвигатель постоянного тока. **Возмущающим воздействием** на объект управления является изменение наружной температуры воздуха  $\theta_n$ .

Для названных элементов необходимо получить их **математическое описание**, т. е. соответствующие математические формулы, описывающие их работу.

Одним из способов получения математического описания элемента (системы) является **теоретический** (исходя из законов физики: закон сохранения энергии, массы, импульса, законы Кирхгофа и т. д.). Полученные таким образом математические модели описывают внутренние связи в объекте и, как правило, наиболее точны. Получим теоретическим путем математическое описание для некоторых элементов из рассматриваемой нами САР температуры в помещении [2].

1. **Объект управления** – помещение. Значение температуры воздуха в помещении  $\theta$  зависит от двух величин: мощности работающего электронагревателя  $P$  и температуры наружного воздуха  $\theta_n$ . В данном случае для упрощения последующих рассуждений мы будем пренебрегать другими обстоятельствами, которые могут влиять на температуру в помещении, такими, например, как уровень солнечного освещения или скорость ветра снаружи. Для получения математической формулы, отражающей эту зависимость,

будем руководствоваться простейшими сведениями из области теплофизики и теплообмена. В процессе нагрева помещения одна часть тепловой мощности электронагревателя  $P_1$  расходуется на увеличение температуры в помещении, а другая часть  $P_2$  рассеивается наружу путем теплопередачи через стены. Соответствующие математические формулы имеют следующий вид:

$$P_1 = c \cdot \frac{d\theta}{dt}, \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{S \cdot \kappa}{l} \cdot (\theta - \theta_n), \quad (2)$$

где  $c$  [Дж/°С] – теплоемкость помещения;

$S$  [м<sup>2</sup>] – площадь стен;

$\kappa$  [Вт/(м·°С)] – коэффициент теплопроводности стен (зависит от материала стен);

$l$  [м] – толщина стен.

Учитывая, что сумма обеих мощностей равна мощности электронагревателя, получим:

$$c \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{S \cdot \kappa}{l} \cdot (\theta - \theta_n) = P.$$

Преобразуем эту формулу таким образом, чтобы все члены, содержащие выходную величину (температура  $\theta$ ), располагались в левой части уравнения, а входные величины ( $P$  и  $\theta_n$ ) – в правой части, получим в итоге математическое описание рассматриваемого объекта управления:

$$T \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta = K \cdot P + \theta_n, \quad (3)$$

где  $T = \frac{c \cdot l}{S \cdot \kappa}$  [с] – постоянная времени;

$K = \frac{l}{S \cdot \kappa}$  [°С/Вт] – коэффициент усиления (преобразования).

Это уравнение является дифференциальным уравнением первого порядка, так как содержит оператор дифференцирования первого порядка – производную  $\frac{d\theta}{dt}$ . Кроме того, это уравнение является линейным, так как и входные, и выходные величины состоят в нем в виде линейных слагаемых.

2. **Датчик** – термосопротивление – представляет собой металлический элемент (медный, платиновый, никелевый), имеющий при температуре 0 °С некоторое определенное сопротивление  $R_0$ . Как известно из курса физики, электрическое сопротивление металла при температурах до 600 °С почти линейно возрастает с увеличением температуры:

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot \theta_d), \quad (4)$$

где  $R_0$  [Ом] – значение сопротивления датчика при температуре 0 °С;

$\theta_d$  [°С] – температура чувствительного элемента датчика;

$A$  [°С<sup>-1</sup>] – постоянный коэффициент, значение которого зависит от металла, из которого изготовлен датчик (например, для датчика Pt100  $A = 3,9 \cdot 10^{-3}$  °С<sup>-1</sup>).

Если такой датчик поместить в среду с некоторой температурой  $\theta$ , отличной от  $\theta_d$ , то будет происходить теплообмен между чувствительным элементом датчика и окружающей средой, в результате чего температура датчика будет стремиться к температуре среды, при этом, соответственно, будет меняться и его сопротивление (рис. 2). Математически этот процесс будет описываться следующими формулами:

$$dQ = \kappa_d \cdot (\theta - \theta_d) \cdot dt, \quad (5)$$

$$dQ = c_d \cdot d\theta_d, \quad (6)$$

где  $dQ$  [Дж] – количество теплоты, переданное от окружающей среды датчику за малый промежуток времени  $dt$ ;

$\kappa_d$  [Дж/(°С·с)] – некоторый постоянный коэффициент, характеризующий теплопроводность чувствительного элемента датчика;

$c_d$  [Дж/°С] – теплоемкость чувствительного элемента датчика (зависит от его массы и удельной теплоемкости металла).

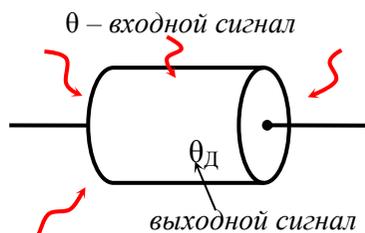


Рис. 2. Термосопротивление

Приравняв выражения (5) и (6), а также выразив из формулы (4) температуру  $\theta_d$ :

$$\theta_d = \frac{1}{R_0 \cdot A} \cdot (R - R_0),$$

получим

$$T_d \cdot \frac{dR_d}{dt} + R_d = K_d \cdot \theta, \quad (7)$$

где  $R_d = R - R_0$  – выходной сигнал датчика;

$$T_d = \frac{c_d}{\kappa_d} \text{ [с]} - \text{ постоянная времени датчика;}$$

$K_d = R_0 \cdot A$  [Ом/°С] – коэффициент преобразования (усиления) датчика.

3. **Устройство сравнения** – измерительный резистивный мост из четырех сопротивлений  $R_1, R_2, R_3, R_d$ . Входными сигналами являются величины сопротивления задатчика  $R_1$  и сопротивления датчика  $R_d$ ; выходной сигнал – напряжение разбаланса моста  $U_M$  (рис. 3, а). Используя законы Кирхгофа, получим

$$U_1 = i_1 \cdot R_{3AD} = \frac{U_{\Pi}}{(R_1 + R_{3AD})} \cdot R_{3AD},$$

$$U_2 = i_2 \cdot R_d = \frac{U_{\Pi}}{(R_2 + R_d)} \cdot R_d,$$

$$U_M = \frac{U_{\Pi}}{(R_1 + R_{3AD})} \cdot R_{3AD} - \frac{U_{\Pi}}{(R_2 + R_d)} \cdot R_d, \quad (8)$$

где  $U_{\Pi}$  [В] – некоторое постоянное напряжение питания моста.

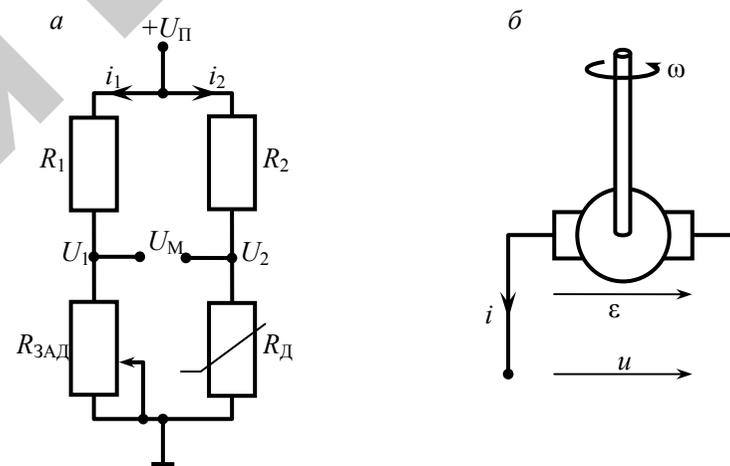


Рис. 3. Измерительный резистивный мост (а) и двигатель постоянного тока (б)

4. **Двигатель постоянного тока.** Для получения его математического описания теоретическим путем необходимо использовать законы механики и электротехники. Входным сигналом данного объекта является напряжение якоря  $u(t)$ ; выходным сигналом – угол поворота вала двигателя  $\varphi(t)$ . Вал двигателя начинает вращаться, когда приложено напряжение питания. Если напряжение питания не меняется ( $u(t) = \text{const}$ ), то угловая скорость вращения вала двигателя остается постоянной ( $\omega(t) = \text{const}$ ), при этом угол поворота вала двигателя будет равномерно увеличиваться. Угол

поворота вала двигателя  $\varphi(t)$  связан с его угловой скоростью вращения интегральным выражением:

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(\tau) \cdot d\tau. \quad (9)$$

Чем больше напряжение, тем быстрее вращается вал. Уравнение динамики вращательного движения вала имеет следующий вид:

$$J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = M(t) - M_H(t), \quad (10)$$

где  $M(t)$  [Н·м] – вращающий момент – электромагнитный момент двигателя;

$M_H(t)$  [Н·м] – момент нагрузки;

$J$  [кг·м<sup>2</sup>] – суммарный момент инерции якоря и нагрузки.

Как следует из курса электротехники, электромагнитный момент двигателя определяется по формуле:

$$M(t) = C_M \cdot \Phi \cdot i(t), \quad (11)$$

где  $C_M$  – безразмерный коэффициент;

$\Phi$  [Вб] – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения;

$i(t)$  [А] – ток якоря, который может быть найден из уравнения:

$$u(t) = e(t) + R \cdot i(t), \quad (12)$$

где  $e(t)$  [В] – электродвижущая сила (ЭДС) якоря;

$R$  [Ом] – сопротивление якорной цепи.

В свою очередь, ЭДС рассчитывается через магнитный поток и частоту вращения:

$$e(t) = C_\omega \cdot \Phi \cdot \omega(t), \quad (13)$$

где  $C_\omega$  – безразмерный коэффициент.

Таким образом, из уравнений (9)–(13) можно получить следующее дифференциальное уравнение, представляющее собой математическое описание электродвигателя постоянного тока:

$$T \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} = K_1 \cdot u(t) - K_2 \cdot M_H(t), \quad (14)$$

$$\text{где } T = \frac{J \cdot R}{C_M \cdot C_\omega \cdot \Phi^2};$$

$$K_1 = \frac{R}{C_M \cdot \Phi};$$

$$K_2 = \frac{R}{C_M \cdot C_\omega \cdot \Phi^2}.$$

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

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

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

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

$$\begin{aligned} a_0 \cdot \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \cdot \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \cdot \frac{dy}{dt} + a_n \cdot y = \\ = b_0 \cdot \frac{d^m u}{dt^m} + b_1 \cdot \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + \dots + a_m \cdot u, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n$  – некоторые постоянные коэффициенты;

$n$  – порядок системы;

$m < n$ .

Так, например, уравнение для термосопротивления (7) получается из общего уравнения (15), если в (15) принять следующие обозначения:  $n = 1$ ;  $a_0 = T_{\text{д}}$ ;  $a_1 = 1$ ;  $m = 0$ ;  $b_0 = K_{\text{д}}$ .

**Нелинейными элементами** называются элементы, описываемые нелинейными уравнениями.

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

Из приведенных выше примеров математического описания элементов систем автоматики к линейным можно отнести математические модели помещения (3), термосопротивления (7) и электродвигателя постоянного тока (14). Математическое описание измерительного резистивного моста является нелинейным, так как в выражении (8) входные величины  $R_1$  и  $R_{\text{д}}$  входят в знаменатели слагаемых дробей.

### Режимы работы и характеристики элементов и систем автоматики

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

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

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

Например, рассмотрим датчик температуры (термосопротивление), помещенный в среду с некоторой неизменной во времени температурой  $\theta$  ( $\theta(t) = \text{const}$ ). Очевидно, что после того, как температура чувствительного элемента датчика станет равна температуре среды  $\theta$ , сопротивление датчика также установится, т. е. примет некоторое неизменное во времени значение  $R_{\text{д}}(t) = \text{const}$ , а значит  $\frac{dR_{\text{д}}}{dt} = 0$ .

В результате математическое выражение (7) примет следующий вид:

$$R_{\text{д}} = K_{\text{д}} \cdot \theta. \quad (16)$$

Математическая зависимость (16), таким образом, представляет собой статическую характеристику термосопротивления.

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

Если датчик температуры с некоторой начальной температурой чувствительного элемента  $\theta_0$  и соответствующим начальным значением сопротивления  $R_{\text{д}0}$  поместить в среду с температурой  $\theta_1$ , отличной от  $\theta_0$ , то начнет происходить переходный процесс: температура чувствительного элемента датчика за счет теплообмена с окружающей средой начнет постепенно приближаться к значению температуры среды  $\theta_1$ , при этом его сопротивление также будет изменяться в соответствии с формулой (7). Имеет место изменение входного воздействия на датчик температуры: до момента времени  $t = 0$  температура среды (и самого датчика) была равна  $\theta_0$ , а начиная с момента  $t = 0$ , температура среды стала  $\theta_1$ :

$$\theta(t) = \begin{cases} \theta_0, & t < 0; \\ \theta_1, & t \geq 0. \end{cases}$$

Тогда решение дифференциального уравнения (7) имеет вид:

$$R_{\text{д}}(t) = R_{\text{д}0} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{д}}}} + K_{\text{д}} \cdot \theta_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{д}}}}\right). \quad (17)$$

Соответствующий график изменения во времени сопротивления датчика температуры приведен на рис. 4.

После окончания переходного процесса датчик придет к статическому режиму работы.

Поведение элементов (систем) автоматики в реальных условиях представляет собой сочетание переходного и установившегося режимов и, очевидно, существенно зависит от формы входного сигнала  $x = x(t)$ . Изменение во времени внешних воздействий (например, изменение температуры наружного воздуха в течение суток) могут быть весьма различны и заранее неизвестны. В этом случае

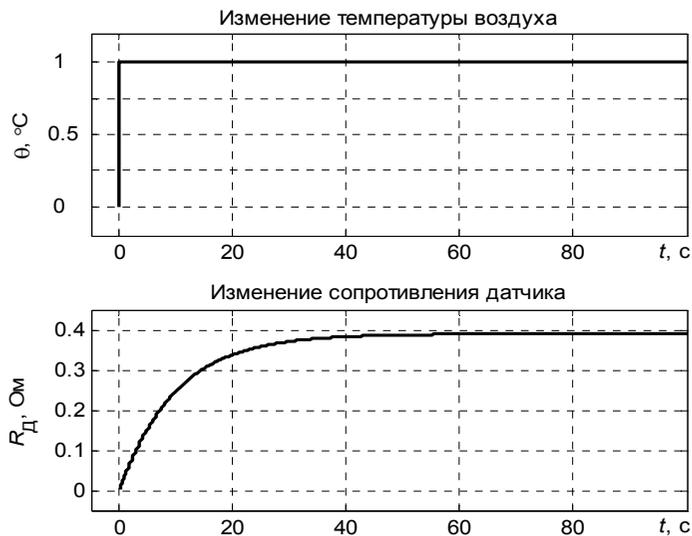


Рис. 4. Изменение сигнала датчика температуры Pt100 при ступенчатом входном воздействии (изменении температуры воздуха)

при математическом описании элементов (систем) автоматики возникают трудности принципиального характера, т. к. заранее неизвестны законы изменения внешних воздействий, что затрудняет анализ динамики и статики САУ. Для устранения этого затруднения при анализе работы элементов (систем) автоматики принято использовать так называемые **типовые воздействия**, которые являются математическими моделями часто встречающихся реальных воздействий. В качестве типовых рассматривают следующие воздействия:

1. **Ступенчатое воздействие** – это воздействие, которое мгновенно возрастает от нуля до некоторого значения и далее остается постоянным:

$$x(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0, \\ a, & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (18)$$

где  $a$  – величина ступенчатого воздействия.

При  $a = 1$  имеет место единичное ступенчатое воздействие, обозначаемое следующим образом:

$$1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0, \\ 1, & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (19)$$

Реакция элемента (системы) на единичное ступенчатое воздействие называется **переходной функцией** элемента (системы). Так, на рис. 4 изменение температуры воздуха представляет собой единичное ступенчатое воздействие на датчик температуры, а изменение сопротивления датчика – переходную функцию. Переходная функция обычно обозначается  $h(t)$ .

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

## 2. Импульсное воздействие (дельта-функция):

$$x(t) = \delta(t) = \begin{cases} \infty, & \text{при } t = 0, \\ 0, & \text{при } t \neq 0, \end{cases} \quad (20)$$

при этом согласно определению:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) \cdot dt = 1. \quad (21)$$

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

В качестве физической интерпретации импульсного воздействия можно привести следующий пример. Пусть частица некоторой массы, движущаяся вдоль прямой, в некоторый момент времени  $t = 0$  при соударении с другой частицей изменяет свою скорость с  $v_1$  до  $v_2$ . Тогда зависимость от времени ускорения частицы будет описываться следующим выражением:

$$a(t) \approx \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0, \\ \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}, & \text{при } 0 \leq t \leq \Delta t, \\ 0, & \text{при } t > \Delta t. \end{cases}$$

Если считать, что длительность соударения  $\Delta t \rightarrow 0$  (соударение происходит почти мгновенно), то получается, что

$$a(0) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \infty,$$

т. е. изменение во времени ускорения частицы приблизительно описывается дельта-функцией (20):  $a(t) \approx \delta(t)$ .

Дельта-функция связана с единичным ступенчатым воздействием выражением

$$\delta(t) = 1'(t), \quad (22)$$

т. е. дельта-функция равна производной от ступенчатого воздействия.

Реакция элемента (системы) на единичный импульс (дельта-функцию) называется **импульсной характеристикой** и обозначается  $w(t)$ . Импульсная характеристика линейного элемента (системы)  $w(t)$  связана с его переходной функцией выражением:

$$w(t) = h'(t). \quad (23)$$

### 3. Гармоническое воздействие:

$$x(t) = A_x \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (24)$$

либо

$$x(t) = A_x \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (25)$$

где  $A_x$  – амплитуда;  
 $\omega$  [рад/с] – круговая частота.

Если на линейное звено (систему) подать гармоническое воздействие (24), то после окончания переходного процесса на выходе звена установится также гармонический сигнал:

$$y(t) = A_y \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (26)$$

где  $A_y$  – амплитуда выходного сигнала;

$\varphi$  [рад] – разность фаз между выходным и входным сигналами.

На рис. 5, а показано линейное звено, представляющее собой электрическую схему из последовательно соединенных активного сопротивления  $R$  и конденсатора емкостью  $C$ . Математическое описание такого звена имеет следующий вид<sup>1</sup>:

$$T \cdot \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt} + u_{\text{ВЫХ}} = K \cdot u_{\text{ВХ}},$$

где  $T = R \cdot C$ ;

$K = 1$ .

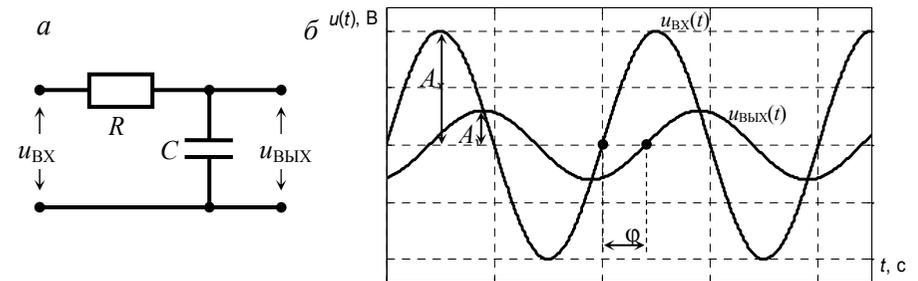


Рис. 5. При подаче гармонического сигнала на вход линейного динамического звена (а) выходной сигнал также гармонический (б)

<sup>1</sup> В качестве упражнения студенту предлагается самостоятельно получить математическое описание данного звена теоретическим способом, основываясь на формулах из курса электротехники.

На рис. 5 б показано входное гармоническое воздействие – изменение напряжения  $u_{\text{ВХ}}(t)$  на входе RC-звена, и соответствующий выходной сигнал – изменение напряжения на конденсаторе.

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

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

$$A(\omega) = \frac{A_y}{A_x}. \quad (27)$$

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

Переходная функция и импульсная характеристика относятся к **временным характеристикам звена**, так как они показывают зависимость от времени реакции звена на ступенчатое или импульсное входное воздействие.

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

В теории автоматического управления математическое описание линейных элементов, объектов или систем принято выражать не в виде дифференциальных уравнений (как, например, дифференциальные уравнения (3), (7), (14)), которые часто могут иметь достаточно сложный вид и еще более сложное решение, а в виде **передаточной функции  $W$** .

Передаточная функция элемента (объекта)  $W$  связывает его входной и выходной сигналы  $x$  и  $y$  при нулевых начальных условиях (т. е. считается, что в начальный момент времени  $t = 0$  значения входного и выходного сигналов равны нулю:  $x(t = 0) = 0, y(t = 0) = 0$ ). Формально передаточная функция объекта определяется как отношение преобразования Лапласа его выходного сигнала к преобразованию Лапласа входного сигнала:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}, \quad (28)$$

где  $s = \sigma + j \cdot \omega$  – комплексная переменная, в которой  $\sigma = 0$  для всех реализуемых на практике физических сигналов, а  $\omega$  имеет физический смысл частоты гармонического сигнала.

В качестве примера рассмотрим еще раз гармонический сигнал вида (25). Известно, что гармонический сигнал с помощью формулы Эйлера может быть выражен в комплексной форме:

$$x = A_x \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}, \quad (29)$$

где  $A_x$  – амплитуда сигнала;  
 $\omega$  [рад./с] – его круговая частота;  
 $j^2 = -1$ .

Обозначив произведение  $j \cdot \omega$  символом  $s$ , получим

$$x = A_x \cdot e^{s \cdot t}. \quad (30)$$

Для гармонического сигнала вида (30) математическая операция взятия производной эквивалентна (т. е. может быть заменена) умножению самого сигнала на комплексную переменную  $s = j \cdot \omega$ .

Действительно, производная сигнала вида (30) по времени равна

$$\frac{dx}{dt} = A_x \cdot (e^{s \cdot t})' = A_x \cdot e^{s \cdot t} \cdot s = s \cdot A_x \cdot e^{s \cdot t},$$

$$\frac{dx}{dt} = s \cdot x. \quad (31)$$

Вторая производная сигнала по времени в этом случае будет равна

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = (s \cdot A_x \cdot e^{s \cdot t})' = s \cdot A_x \cdot (e^{s \cdot t})' = s \cdot A_x \cdot e^{s \cdot t} \cdot s = s^2 \cdot A_x \cdot e^{s \cdot t},$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = s^2 \cdot x. \quad (32)$$

Допустим теперь, что имеется некоторый элемент, который математически описывается дифференциальным уравнением

$$T \cdot \frac{dy}{dt} + y = K \cdot x. \quad (33)$$

Пусть на вход этого элемента подается гармонический сигнал  $x$  вида (30). Так как дифференциальное уравнение (33) линейное, а значит, и сам элемент является линейным, то выходной сигнал  $y$  также будет гармоническим. Поэтому для нахождения связи между входным и выходным сигналами не обязательно решать уравнение (33), а можно заменить в нем операцию взятия производной умножением на комплексную переменную  $s = j \cdot \omega$ . В итоге получим

$$T \cdot s \cdot y + y = K \cdot x,$$

$$(T \cdot s + 1) \cdot y = K \cdot x,$$

$$W(s) = \frac{y}{x} = \frac{K}{T \cdot s + 1}. \quad (34)$$

Известно, что практически любой изменяющийся во времени физический сигнал (например, изменение электрического напряжения, тока, скорости, давления, уровня жидкости, температуры и т. д.) можно представить в виде суммы гармонических сигналов разной частоты и амплитуды<sup>2</sup>. Поэтому описанный подход, при котором

<sup>2</sup> Ярким практическим примером этого является разложение звука на сумму отдельных гармонических колебаний разных частот, что можно наблюдать, например, при воспроизведении голоса или музыки на компьютере.

операция дифференцирования заменяется умножением на комплексную переменную  $s = j \cdot \omega$ , справедлив не только для гармонических, а для всех физически реализуемых сигналов (т. е. для всех сигналов любой формы, встречающихся на практике).

Описанный подход был предложен французским учеными П. С. Лапласом и Ш. Фурье.

### Расчет статических и частотных характеристик

Рассмотрим схему, состоящую из трех сопротивлений  $R_1, R_2, R_3$  и двух конденсаторов  $C_1, C_2$ , соединенных так, как показано на рис. 6. Входной величиной является напряжение  $U_1$ , подаваемое на схему. Выходной величиной – напряжение  $U_2$  на сопротивлении  $R_3$ .

Рассчитаем статические и частотные характеристики, рассматривая приведенную схему в качестве одного звена (элемента). Для этого следует вначале найти зависимость, связывающую входную и выходную величины, в виде дифференциального уравнения, используя известные законы физики.

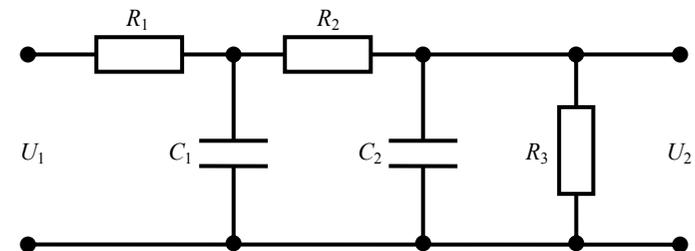


Рис. 6. Исследуемая схема:  $U_1$  – входное воздействие;  $U_2$  – выходная величина

**1. Вывод уравнения звена.** Найдем зависимость  $U_2$  от  $U_1$ . Для этого воспользуемся вторым законом Кирхгофа для контура, образованного  $R_1$  и  $C_1$ , и контура, образованного  $C_1, R_2, C_2, R_3$ :

$$\begin{cases} U_1 = U_{R_1} + U_{C_1}; \\ U_{C_1} = R_2 \cdot \left( C_2 \cdot \frac{dU_2}{dt} + \frac{U_2}{R_3} \right) + U_2, \end{cases} \quad (35)$$

где  $U_{R_1}$  и  $U_{C_1}$  – падение напряжений на сопротивление  $R_1$  и емкости  $C_1$ .

Выразим  $U_{R1}$  через известные сопротивления и емкости цепи:

$$U_{R1} = R_1 \cdot \left( C_1 \cdot \frac{dU_{C1}}{dt} + C_2 \cdot \frac{dU_{C2}}{dt} + \frac{U_2}{R_3} \right). \quad (36)$$

Производную  $\frac{dU_{C1}}{dt}$  найдем из второго уравнения системы (35):

$$\frac{dU_{C1}}{dt} = R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2U_2}{dt^2} + \frac{R_2}{R_3} \cdot \frac{dU_2}{dt} + \frac{dU_2}{dt}. \quad (37)$$

Подставив выражение (37) в (36), получим

$$U_{R1} = R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2U_2}{dt^2} + \left( \frac{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2}{R_3} + R_1 \cdot C_1 + C_2 \cdot R_1 \right) \cdot \frac{dU_2}{dt} + \frac{R_1}{R_3} \cdot U_2. \quad (38)$$

Подставив выражение (38) в первое уравнение системы (35), получим искомое математическое описание заданного звена:

$$U_1 = R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2U_2}{dt^2} + \left( \frac{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2}{R_3} + R_1 \cdot C_1 + C_2 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2 \right) \times \frac{dU_2}{dt} + \left( \frac{R_1}{R_3} + \frac{R_2}{R_3} + 1 \right) \cdot U_2. \quad (39)$$

В теории автоматического управления принято в уравнениях входные переменные располагать в правой части, а выходные – в левой части уравнения. Кроме того, принято преобразовывать

уравнение так, чтобы коэффициент при выходной величине (в нашем случае  $U_2$ ) в первой степени был равен 1.

В рассматриваемом примере получим

$$\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}{(R_1 + R_2 + R_3)} \cdot \frac{d^2U_2}{dt^2} + \frac{(R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 + R_1 \cdot R_3 \cdot C_1 + R_1 \cdot R_3 \cdot C_2 + R_2 \cdot R_3 \cdot C_2)}{(R_1 + R_2 + R_3)} \times \frac{dU_2}{dt} + U_2 = \frac{R_3}{(R_1 + R_2 + R_3)} \cdot U_1. \quad (40)$$

Постоянный коэффициент при второй производной  $\frac{d^2U_2}{dt^2}$ , имеющий размерность  $[c^2]$ , обозначим  $\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}{(R_1 + R_2 + R_3)} = T_2^2$ ;

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

$$\frac{(R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 + R_1 \cdot R_3 \cdot C_1 + R_1 \cdot R_3 \cdot C_2 + R_2 \cdot R_3 \cdot C_2)}{(R_1 + R_2 + R_3)} = T_1;$$

коэффициент при входной величине  $U_1$  обозначим  $\frac{R_3}{(R_1 + R_2 + R_3)} = K$ .

Окончательно получим

$$T_2^2 \cdot \frac{d^2U_2}{dt^2} + T_1 \cdot \frac{dU_2}{dt} + U_2 = K \cdot U_1. \quad (41)$$

Коэффициенты при производных выходной величины называют **постоянными времени** (в нашем случае это  $T_1$  и  $T_2$ ). Они имеют размерность времени. Коэффициенты при входной величине (в нашем случае  $K$ ) называют **коэффициентами передачи**.

**2. Получение передаточной функции звена.** Выполним преобразование Лапласа дифференциального уравнения (41):

$$T_2^2 \cdot s^2 \cdot U_2(s) + T_1 \cdot s \cdot U_2(s) + U_2(s) = K \cdot U_1(s).$$

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

$$W(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{K}{T_2^2 \cdot s^2 + T_1 \cdot s + 1}. \quad (42)$$

**3. Расчет статической характеристики звена.** В статическом режиме после завершения переходного процесса сигналы  $U_1$  и  $U_2$  постоянны, т. е. производные  $dU_1/dt = 0$  и  $dU_2/dt = 0$ . Таким образом, приравняв нулю производные  $dU_2/dt = 0$  и  $d^2U_2/dt^2 = 0$  в уравнении (41), получим статическую характеристику рассматриваемого звена:

$$U_2(s) = K \cdot U_1(s). \quad (43)$$

Такой же результат можно получить и из передаточной функции (42), приравняв нулю переменную  $s$ .

**4. Расчет частотных характеристик звена.** В выражении передаточной функции (42) выполним подстановку  $s = j \cdot \omega$ :

$$\begin{aligned} W(\omega) &= \frac{K}{T_2^2 \cdot j^2 \cdot \omega^2 + T_1 \cdot j \cdot \omega + 1} = \frac{K}{(1 - T_2^2 \cdot \omega^2) + j \cdot (T_1 \cdot \omega)} = \\ &= \frac{K \cdot ((1 - T_2^2 \cdot \omega^2) - j \cdot (T_1 \cdot \omega))}{((1 - T_2^2 \cdot \omega^2) + j \cdot (T_1 \cdot \omega)) \cdot ((1 - T_2^2 \cdot \omega^2) - j \cdot (T_1 \cdot \omega))} = \\ &= \frac{K \cdot (1 - T_2^2 \cdot \omega^2) + j \cdot (-K \cdot T_1 \cdot \omega)}{(1 - T_2^2 \cdot \omega^2)^2 + (T_1 \cdot \omega)^2} = \\ &= \frac{K \cdot (1 - T_2^2 \cdot \omega^2)}{(1 - T_2^2 \cdot \omega^2)^2 + (T_1 \cdot \omega)^2} + j \cdot \frac{-K \cdot T_1 \cdot \omega}{(1 - T_2^2 \cdot \omega^2)^2 + (T_1 \cdot \omega)^2}. \end{aligned}$$

В результате получаем комплексное выражение вида:

$$W(\omega) = U(\omega) + j \cdot V(\omega),$$

$$\text{где } U(\omega) = \frac{K \cdot (1 - T_2^2 \cdot \omega^2)}{(1 - T_2^2 \cdot \omega^2)^2 + (T_1 \cdot \omega)^2} \text{ — действительная часть частотной}$$

передаточной функции;

$$V(\omega) = \frac{-K \cdot T_1 \cdot \omega}{(1 - T_2^2 \cdot \omega^2)^2 + (T_1 \cdot \omega)^2} \text{ — мнимая часть частотной пе-}$$

редаточной функции.

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

$$A(\omega) = \sqrt{U^2 + V^2} = \frac{K}{\sqrt{(1 - T_2^2 \cdot \omega^2)^2 + (T_1 \cdot \omega)^2}}; \quad (44)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{V}{U}\right) = -\arctg\left(\frac{T_1 \cdot \omega}{1 - T_2^2 \cdot \omega^2}\right). \quad (45)$$

По результатам расчетов строятся графики АЧХ и ФЧХ. Общий вид графиков АЧХ и ФЧХ, соответствующих выражениям (44), (45), показан на рис. 7.

Кроме того, часто строится совместная **амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ)**. График АФЧХ, называемый также **годографом**, объединяет на одной плоскости АЧХ и ФЧХ. При построении графика АФЧХ в прямоугольных декартовых координатах по горизонтальной оси следует откладывать значение действительной части частотной передаточной функции  $\text{Re}(W(\omega))$ , а по вертикальной оси — соответствующие значения мнимой части  $j \cdot \text{Im}(W(\omega))$ . Общий вид графика АФЧХ для рассматриваемого звена показан на рис. 8.

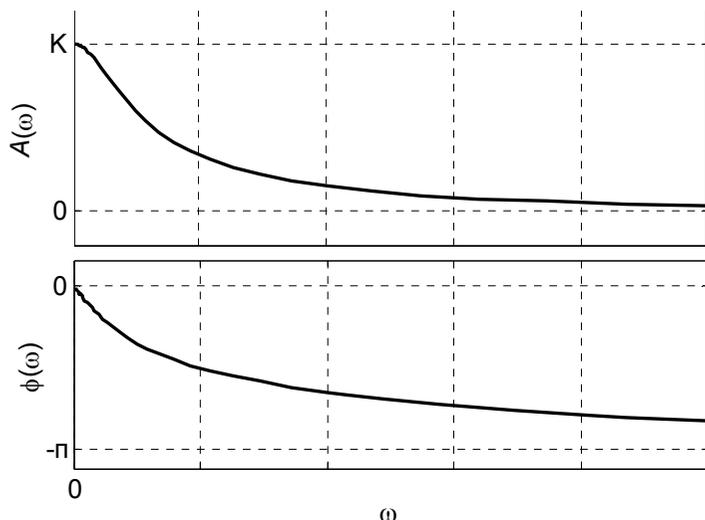


Рис. 7. Общий вид графиков АЧХ и ФЧХ рассматриваемого звена

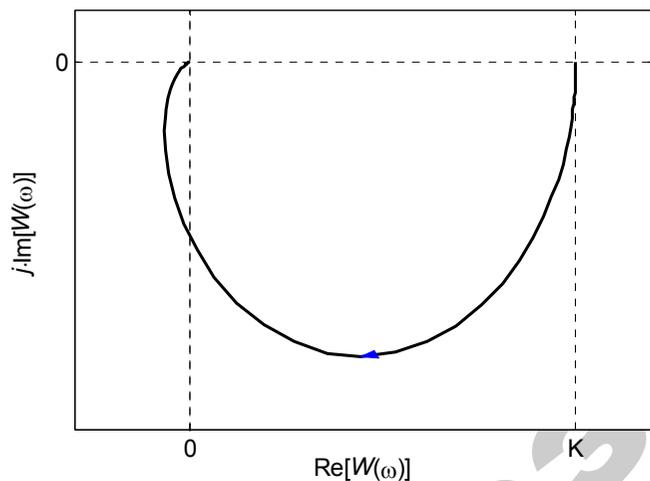


Рис. 8. Общий вид графика АФЧХ рассматриваемого звена

### Линеаризация

Уравнения элементов систем автоматизации часто оказываются нелинейными. Примером этого может служить уравнение (8), описывающее работу резистивного моста как элемента сравнения.

Методы исследования нелинейных систем автоматике значительно сложнее методов исследования линейных систем, поэтому, если это возможно, их стремятся линеаризовать, т. е. заменить исходные нелинейные уравнения линейными, приближенно описывающими процессы в системе. Процесс преобразования нелинейных уравнений в линейные называют **линеаризацией**.

В автоматических системах должен поддерживаться некоторый заданный режим. При этом режиме входные и выходные величины звеньев системы изменяются по определенному закону. В частности, в системах стабилизации они принимают определенные постоянные значения. Но из-за различных возмущающих факторов фактический режим отличается от требуемого (заданного), поэтому текущие значения входных и выходных величин не равны значениям, соответствующим заданному режиму. В нормально функционирующей автоматической системе режим работы немного отличается от заданного режима, поэтому отклонения входных и выходных величин входящих в нее звеньев от заданных значений малы. Таким образом, идея метода линеаризации заключается в замене исходной нелинейной характеристики системы (или ее отдельного звена)  $y = f(x)$  линейной функцией в окрестностях некоторой точки с координатами  $x_0, y_0$ , соответствующей заданному режиму работы (рис. 9).

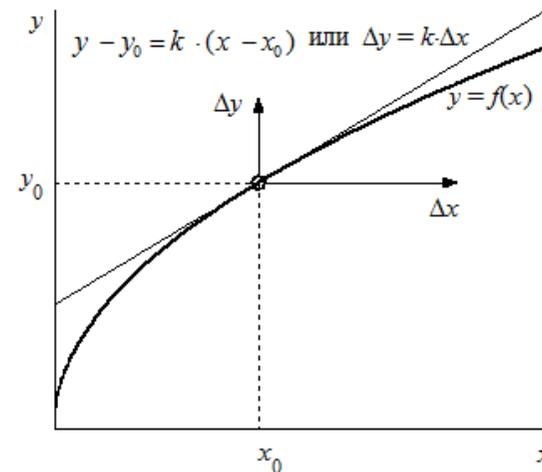


Рис. 9. Нелинейная статическая характеристика

При этом линейная характеристика является **касательной** к исходной нелинейной в этой точке. Очевидно, что при малых отклонениях переменных от точки, в которой проведена такая замена, линейная характеристика довольно точно соответствует исходной нелинейной.

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

$$y(x) = y(x_0) + y'(x_0) \cdot (x - x_0) + \frac{y''(x_0)}{2!} \cdot (x - x_0)^2 + \dots \quad (46)$$

Если отклонения входного и выходного сигналов от заданных значений  $x_0, y_0$  достаточно малы, то при разложении в ряд Тейлора можно учитывать **только линейные члены**, а остальными пренебречь:

$$y(x) \approx y(x_0) + y'(x_0) \cdot (x - x_0). \quad (47)$$

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

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

В общем случае уравнение нелинейного звена имеет вид:

$$f(x, x', x'', \dots, y, y', y'', \dots) = 0. \quad (48)$$

Разложив эту функцию в ряд Тейлора в окрестностях точки с координатами  $x_0, y_0$ , получим линеаризованное уравнение звена

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial f}{\partial x'} \cdot \Delta x' + \frac{\partial f}{\partial x''} \cdot \Delta x'' + \dots + \\ & + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \Delta y + \frac{\partial f}{\partial y'} \cdot \Delta y' + \frac{\partial f}{\partial y''} \cdot \Delta y'' + \dots = 0, \end{aligned}$$

где все частные производные функции (48) вычисляются для точки с координатами  $x_0, y_0$ .

Разделим в полученном уравнении все члены на  $\partial f / \partial y$ . Обозначим коэффициенты при производных выходной величины  $y$  как постоянные времени, коэффициенты при входном воздействии  $x$  и его производных как коэффициенты передачи:

$$\frac{\partial f}{\partial y'} \bigg/ \frac{\partial f}{\partial y} = T_1;$$

$$\frac{\partial f}{\partial y''} \bigg/ \frac{\partial f}{\partial y} = T_2;$$

...

$$\frac{\partial f}{\partial x} \bigg/ \frac{\partial f}{\partial y} = -K_0;$$

$$\frac{\partial f}{\partial x'} \bigg/ \frac{\partial f}{\partial y} = -K_1;$$

$$\frac{\partial f}{\partial x''} \bigg/ \frac{\partial f}{\partial y} = -K_2;$$

...

В итоге получим линеаризованное уравнение звена

$$\Delta y + T_1 \cdot \Delta y' + T_2 \cdot \Delta y'' + \dots = K_0 \cdot \Delta x + K_1 \cdot \Delta x' + K_2 \cdot \Delta x''.$$

Обычно знак « $\Delta$ » опускается, поскольку заранее известно, что линеаризованные уравнения записываются в отклонениях от точки  $x_0, y_0$ . Окончательно в общем виде получаем линеаризованное уравнение звена, по форме аналогичное уравнению (15):

$$T_n \cdot y^{(n)} + T_{n-1} \cdot y^{(n-1)} + \dots + T_1 \cdot y' + y = K_m \cdot x^{(m)} + \dots + K_1 \cdot x' + K_0 \cdot x,$$

и соответствующую передаточную функцию:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_m \cdot s^m + \dots + K_1 \cdot s + K_0}{T_n \cdot s^n + T_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + T_1 \cdot s + 1}.$$

Линеаризация может быть проведена двумя методами: **аналитическим** и **графоаналитическим** (обработкой экспериментально полученной нелинейной характеристики).

При аналитической линеаризации уравнение исходной нелинейной характеристики дифференцируется по требуемой переменной. Коэффициент передачи находится путем вычисления производной в точке линеаризации.

При использовании второго метода экспериментально снимается нелинейная характеристика элемента. Коэффициент передачи находится как отношение  $\Delta u/\Delta x$  для касательной в точке линеаризации. Метод применяется при линеаризации гладких нелинейных статических характеристик.

Проиллюстрируем применение обоих методов на примере линеаризации нелинейной статической характеристики резистивного моста, используемого в качестве элемента сравнения.

В системах с управлением по отклонению регулируемой величины от ее заданного значения (по ошибке) элемент сравнения формирует сигнал, пропорциональный ошибке. Резистивный мост (рис. 3, а) часто используется в САР как элемент сравнения, если в системе применяется омический датчик регулируемой величины. Датчик ( $R_d$ ) включается в одно из плеч моста. Сопротивление датчика  $R_d$  является входным сигналом моста. В качестве задатчика регулируемой величины используется одно из сопротивлений, образующих мост ( $R_{3ад}$ ), которое выполняется переменным. Выходным сигналом моста является напряжение  $U_M$ . Отсутствию ошибки соответствует состояние баланса моста, когда напряжение на выходе моста равно нулю.

Уравнение резистивного моста имеет вид:

$$U_M = \frac{U_{\Pi}}{(R_1 + R_{3ад})} \cdot R_{3ад} - \frac{U_{\Pi}}{(R_2 + R_d)} \cdot R_d,$$

где  $U_M$  [В] – напряжение на выходе моста;

$U_{\Pi}$  [В] – напряжение питания на выходе моста;

$R_1, R_2, R_{3ад}, R_d$  [Ом] – сопротивления, образующие мост.

**Линеаризуем** уравнение моста **аналитическим** методом. Для этого уравнение моста преобразуем к виду (48):

$$f(R_d, U_M) = U_M + \frac{U_{\Pi}}{(R_2 + R_d)} \cdot R_d - \frac{U_{\Pi}}{(R_1 + R_{3ад})} \cdot R_{3ад} = 0. \quad (49)$$

Линеаризацию проводим в окрестности точки, для которой значение входного сигнала равно  $R_d = R_{d0}$ , а соответствующее значение выходного сигнала –  $U_M = U_{M0}$ .

Разложив функцию  $f(R_d, U_M)$  в ряд Тейлора в окрестностях точки с координатами  $R_{d0}, U_{M0}$ , получим **линеаризованное уравнение звена**:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial U_M} \right|_{U_M = U_{M0}} \cdot \Delta U_M + \left. \frac{\partial f}{\partial R_d} \right|_{R_d = R_{d0}} \cdot \Delta R_d = 0,$$

где  $\frac{\partial f}{\partial U_M} = 1$ ;  $\frac{\partial f}{\partial R_d} = U_{\Pi} \cdot \frac{1 \cdot (R_2 + R_d) - R_d \cdot (0 + 1)}{(R_2 + R_d)^2} = \frac{U_{\Pi} \cdot R_2}{(R_2 + R_d)^2}$  –

частные производные от функции  $f$ ;

$$\left. \frac{\partial f}{\partial U_M} \right|_{U_M = U_{M0}} = 1; \left. \frac{\partial f}{\partial R_d} \right|_{R_d = R_{d0}} = \frac{U_{\Pi} \cdot R_2}{(R_2 + R_{d0})^2} \text{ – значения частных}$$

производных при  $U_M = U_{M0}$  и  $R_d = R_{d0}$ ;

$$\Delta R_d = R_d - R_{d0}; \Delta U_M = U_M - U_{M0}.$$

Получаем

$$\Delta U_M + \frac{U_{\Pi} \cdot R_2}{(R_2 + R_{d0})^2} \cdot \Delta R_d = 0$$

или

$$\Delta U_M = K_M \cdot \Delta R_d,$$

где  $K_M$  – **коэффициент передачи** моста:

$$K_M = - \frac{U_{\Pi} \cdot R_2}{(R_2 + R_{d0})^2}. \quad (50)$$

Поскольку при использовании моста как элемента сравнения, нулевому отклонению регулируемой величины от заданного значения, а, следовательно, нулевому отклонению сопротивления датчика от его сопротивления  $R_{Д0}$  при заданном значении регулируемой величины, должен соответствовать нулевой выходной сигнал моста, то мост линеаризуется при  $U_{М0} = 0$  в точке баланса моста. При этом линеаризованное уравнение имеет вид:

$$U_{М} = K_{М} \cdot \Delta R_{Д}.$$

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

$$R_{Д0} \cdot R_2 - R_1 \cdot R_{Зад} = 0,$$

тогда

$$R_{Зад} = \frac{R_2 \cdot R_{Д0}}{R_1}, \quad (51)$$

где  $R_{Д0}$  – сопротивление датчика при заданном значении регулируемой величины.

В регулирующих блоках шкала задатчика градуируется непосредственно в единицах регулируемой величины.

### Идентификация

Для синтеза и анализа системы автоматического управления необходимо иметь математические модели объекта управления и элементов, входящих в систему (далее просто объектов). Построение математической модели объекта может производиться несколькими методами:

- теоретическим;
- экспериментальным (идентификация);
- экспериментально-теоретическим.

При **теоретическом способе**, подробно рассмотренном выше, математическое описание объекта получают теоретически, исходя

из известных законов физики (закон сохранения энергии, массы, импульса, законы Кирхгофа и т. д.). Такой подход дает положительный результат, если рассматриваемый объект достаточно прост по структуре и хорошо изучен.

Однако в большинстве случаев теоретическое математическое описание объектов весьма затруднительно из-за сложности протекающих в них процессов или недостатка исходной информации. Так, например, распределение температуры внутри помещения, обогреваемого электронагревателем, зависит не только от тепловой мощности нагревателя и разности температур внутри и снаружи помещения, но также сложным образом зависит от геометрической формы помещения и стен, от места расположения нагревателя в помещении, от наличия в помещении конвективных потоков воздуха.

Поэтому на практике часто математические модели получают путем построения математической модели в результате наблюдения за объектом при различных входных сигналах. При этом опытным путем определяют реакцию объекта на различные входные сигналы, а затем стараются подобрать математическую модель так, чтобы выходные сигналы объекта и его модели совпадали бы как можно точнее при различных входных сигналах.

**Идентификацией** называют получение математических моделей на основании совместного анализа входных и выходных сигналов объекта.

В общем случае задача идентификации является очень сложной. Однако если известно, что объект является приблизительно линейным (т. е. математически приблизительно описывается линейными уравнениями), то процесс его идентификации упрощается: для этого необходимо на вход объекта подать в качестве входного сигнала одно из типовых воздействий (ступенчатое, импульсное либо гармоническое), и затем по виду выходного сигнала можно определить передаточную функцию объекта.

Методика приближенной идентификации объекта по виду его переходной функции (т. е. реакции объекта на ступенчатое входное воздействие) включает в себя следующие шаги:

1. На вход объекта подается **ступенчатое воздействие** (18) и регистрируется изменение во времени выходного сигнала  $y(t)$ .
2. По виду полученной экспериментально переходной функции  $y(t)$  определяется **вид линейного звена**, теоретическая переходная функция

которого по форме наиболее близко соответствует экспериментальной переходной функции  $y(t)$ . Графики и математические выражения для переходных функций наиболее распространенных на практике линейных динамических объектов приведены в табл. 1.

Таблица 1

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

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

3. По графику экспериментальной переходной функции, как показано в табл. 1, определяются **оценки численных значений параметров** передаточной функции выбранного звена (например, для апериодического звена 1-го порядка с чистым запаздыванием – оценки параметров  $K$ ,  $T$  и  $\tau$ )<sup>3</sup>.

4. Для звена с полученной передаточной функцией **рассчитывается теоретически переходная функция**. Если она достаточно точно аппроксимирует экспериментальную переходную функцию  $y(t)$ , то найденная передаточная функция принимается в качестве математической модели объекта. В противном случае необходимо подбирать звено, дающее лучшее совпадение расчетной и экспериментальной переходных функций.

На практике часто используется смешанный способ: структура модели (вид уравнения, связывающего вход и выход элемента) определяется из теории, а коэффициенты находят опытным путем. Например, общий вид уравнения (3), описывающего помещение с электронагревателем, получен нами теоретически. Однако числовые значения постоянных коэффициентов  $T$  и  $K$ , входящих в уравнение (3), зависят от многих факторов (площадь и высота помещения, толщина и материал стен и т. д.), так что их крайне сложно определить теоретически.

В этом случае для определения значений коэффициентов  $T$  и  $K$  необходимо включить (или наоборот – выключить) электронагреватель и при известной мощности электронагревателя  $P$  и наружной температуре  $\theta_n$  исследовать поведение объекта, а именно, скорость изменения со временем температуры в помещении, после чего с помощью соответствующих методов идентификации можно определить значения коэффициентов  $T$  и  $K$ .

Описанный подход к идентификации объекта – **приближенный**, и может иметь значительные погрешности. Для более точной идентификации обработку данных эксперимента необходимо выполнять на компьютере. При этом главной особенностью идентификации динамических объектов с использованием компьютера является то, что компьютер оперирует дискретными данными (рис. 10).

<sup>3</sup> Иногда апериодическое звено 2-го порядка приблизительно представляют апериодическим звеном 1-го порядка с чистым запаздыванием. В этом случае время чистого запаздывания  $\tau$  и постоянную времени  $T$  определяют так, как дополнительно показано на рисунке в табл. 1.

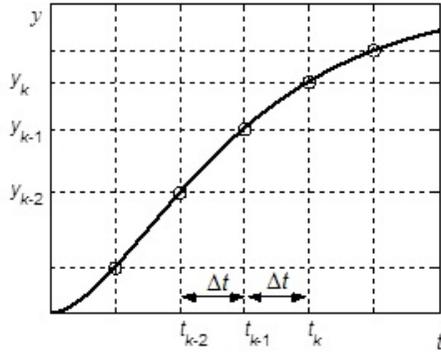


Рис. 10. Дискретные по времени измерения

Поэтому непрерывный динамический объект в данном случае будет приблизительно описываться дискретной динамической моделью, т. е. дискретной передаточной функцией.

В качестве **примера** рассмотрим непрерывное апериодическое звено 1-го порядка. Дифференциальное уравнение, описывающее данное звено, имеет вид (33), а соответствующая непрерывная передаточная функция звена описывается выражением (34).

При дискретной по времени выборке сигнала производная в уравнении (33) заменяется приближенной разностью:

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{y_k - y_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} = \frac{y_k - y_{k-1}}{\Delta t}. \quad (52)$$

Тогда уравнение (33) будет преобразовано следующим образом:

$$T \cdot \frac{(y_k - y_{k-1})}{\Delta t} + y_k = K \cdot x_k;$$

$$\left(\frac{T}{\Delta t} + 1\right) \cdot y_k - \frac{T}{\Delta t} \cdot y_{k-1} = K \cdot x_k;$$

$$y_k - \frac{T}{(T + \Delta t)} \cdot y_{k-1} = \frac{K \cdot \Delta t}{(T + \Delta t)} \cdot x_k;$$

$$y_k + a_1 \cdot y_{k-1} = b_1 \cdot x_k, \quad (53)$$

$$\text{где } a_1 = -\frac{T}{(T + \Delta t)}; \quad b_1 = \frac{K \cdot \Delta t}{(T + \Delta t)}.$$

Применим к уравнению (53) преобразование Лапласа. При этом будем учитывать известное свойство преобразования Лапласа, которое гласит, что чистое запаздывание сигнала по времени эквивалентно умножению изображения Лапласа данного сигнала на экспоненту:

$$L\{y(t - \Delta t)\} = e^{-\Delta t \cdot s} \cdot L\{y(t)\}, \quad (54)$$

откуда получим

$$L\{y_{k-1}\} = L\{y(k \cdot \Delta t - \Delta t)\} = e^{-\Delta t \cdot s} \cdot L\{y(k \cdot \Delta t)\} = e^{-\Delta t \cdot s} \cdot L\{y_k\}. \quad (55)$$

Подставив выражение (55) в (53), получим

$$L\{y_k\} + a_1 \cdot e^{-\Delta t \cdot s} \cdot L\{y_k\} = b_1 \cdot L\{x_k\};$$

$$(1 + a_1 \cdot e^{-\Delta t \cdot s}) \cdot L\{y_k\} = b_1 \cdot L\{x_k\};$$

$$(1 + a_1 \cdot e^{-\Delta t \cdot s}) \cdot Y(s) = b_1 \cdot X(s);$$

где  $X(s) = L\{x_k\}$ ;  $Y(s) = L\{y_k\}$  – изображения Лапласа, соответственно, входного и выходного сигналов.

Введем обозначение

$$z = e^{\Delta t \cdot s}. \quad (56)$$

Множитель  $z^{-1} = e^{-\Delta t \cdot s}$  называется *оператором задержки*.

Получим

$$(1 + a_1 \cdot z^{-1}) \cdot Y(z) = b_1 \cdot X(z);$$

$$W(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_1}{1 + a_1 \cdot z^{-1}}. \quad (57)$$

Формула (57) есть дискретная передаточная функция аperiodического звена 1-го порядка.

В общем случае линейного дискретного динамического звена при наличии чистого запаздывания дискретная передаточная функция определяется выражением

$$W(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = z^{-n_k} \cdot \frac{b_1 + b_2 \cdot z^{-1} + b_3 \cdot z^{-2} + \dots + b_{n_b} \cdot z^{-n_b}}{1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + \dots + a_{n_a} \cdot z^{-n_a}}, \quad (58)$$

где  $n_a, n_b, n_k$  – целые положительные числа.

### Системы автоматического регулирования

В общем случае система автоматического управления имеет структуру, изображенную на рис. 11.

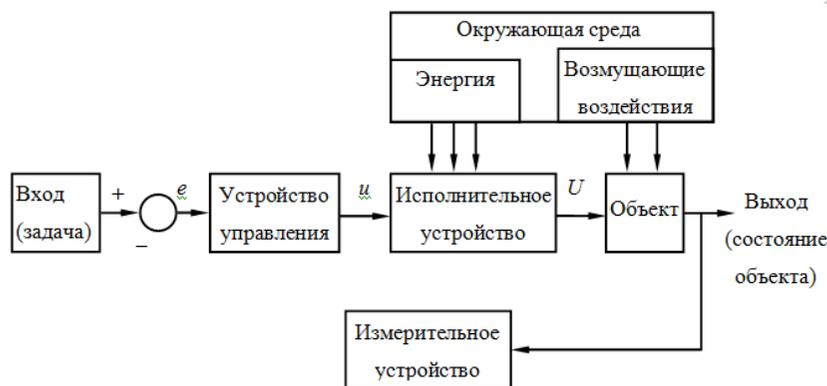


Рис. 11. Общая структура системы автоматического управления:  
 $e$  – сигнал рассогласования (ошибка);  $u$  – сигнал управления;  
 $U$  – управляющее (энергетическое) воздействие

Физический сигнал о состоянии объекта управления по каналу обратной связи поступает на измерительное устройство (датчик), которое выдает информационный сигнал на устройство сравнения, где он сравнивается с входным значением (заданным уровнем сигнала, задатчиком, уставкой). Сигнал рассогласования (сигнал ошибки)  $e$  (error) поступает в устройство управления, которое по заложенному в нем алгоритму обрабатывает информацию и вырабатывает сигнал управления  $u$ , который поступает на вход исполнительного устройства. Исполнительное устройство воспринимает маломощный сигнал управления и вырабатывает управляющее воздействие  $U$ , открывая определенным образом каналы передачи энергии (электрическая энергия, топливо, сжатый воздух и т. п.) от окружения к объекту.

Отдельные элементы системы, изображенной на рис. 11, могут отсутствовать или объединяться, но принципиальным для схемы САУ является наличие обратной связи.

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

Замкнутые системы автоматического управления, целью которых является поддержание управляемой величины  $y$  на определенном постоянном заданном уровне  $y_{\text{зад}}$ , называются системами автоматического регулирования (САР).

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

$$e(t) = y_{\text{зад}}(t) - y(t). \quad (59)$$

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

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

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

$$e(s) = W_{e_{\text{ЗАД}}}(s) \cdot y_{\text{ЗАД}}(s) + W_{e_F}(s) \cdot F(s), \quad (60)$$

где  $W_{e_{\text{ЗАД}}}(s)$  – передаточная функция ошибки САР по задающему воздействию:

$$W_{e_{\text{ЗАД}}}(s) = \frac{e(s)}{y_{\text{ЗАД}}(s)} = \frac{1}{W_0(s) \cdot W_{\text{ОС}}(s) + 1}, \quad (61)$$

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

$$W_{e_F}(s) = \frac{e(s)}{F(s)} = \frac{W_F(s)}{W_0(s) \cdot W_{\text{ОС}}(s) + 1}; \quad (62)$$

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

$W_{\text{ОС}}(s)$  – передаточная функция цепи обратной связи;

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

О качестве регулирования САР судят по ее *переходной функции*, т. е. по реакции системы на единичное ступенчатое изменение задающего или возмущающего воздействия.

Для численной характеристики точности САР используют следующие **показатели качества** (рис. 12):

**Установившаяся (статическая) ошибка регулирования** – это разность между заданным значением управляемой величины и ее установившимся значением после окончания процесса регулирования:

$$e_{\text{СТ}} = y_{\text{ЗАД}} - y_{\text{СТ}}. \quad (63)$$

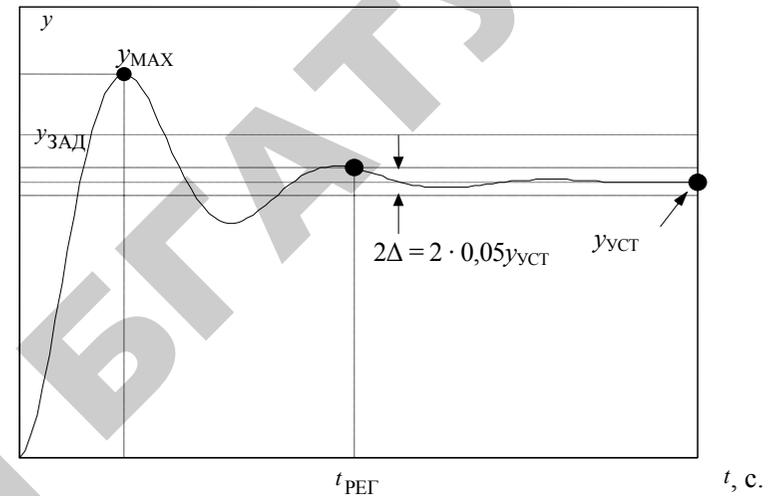


Рис. 12. Переходная функция САР по задающему воздействию:  $y_{\text{ЗАД}}$  – заданное значение управляемой величины;  $y_{\text{УСТ}}$  – установившееся (статическое) значение управляемой величины;  $t_{\text{РЕГ}}$  – время регулирования;  $y_{\text{МАХ}}$  – наибольшее отклонение регулируемой величины в переходном процессе

**2. Динамическая ошибка регулирования** – это максимальное в процессе регулирования отклонение регулируемого параметра от конечного состояния равновесия. На графике рис. 12 динамическая ошибка равна разности

$$e_{\text{Д}} = y_{\text{МАХ}} - y_{\text{УСТ}}.$$

Как правило, динамическую ошибку принято выражать в относительных единицах (в процентах от установившегося значения  $y_{\text{УСТ}}$ ). В этом случае данный показатель качества называется **перерегулированием**:

$$\sigma = \frac{y_{\text{МАХ}} - y_{\text{УСТ}}}{y_{\text{УСТ}}} \cdot 100 \%. \quad (64)$$

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

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

4. **Интегральный показатель качества  $J$**  – определяется по следующей формуле:

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) \cdot dt. \quad (65)$$

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

Значения всех перечисленных показателей качества могут быть определены по графику переходной функции САР, полученному экспериментально либо путем компьютерного моделирования.

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

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

$$U(t) = f(e(t)). \quad (66)$$

Таким образом, закон регулирования определяет основные качественные и количественные характеристики системы.

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

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

## Пропорциональный закон (П-закон)

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

$$U(t) = K_p \cdot e(t). \quad (67)$$

Соответственно, передаточная функция регулятора равна:

$$W_{\text{рег}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_p. \quad (68)$$

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

## Интегральный закон (И-закон)

При интегральном законе регулирования сигнал ошибки  $e(t)$  и управляющее воздействие на объект  $U(t)$  связаны следующим соотношением:

$$U(t) = K_I \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau, \quad (69)$$

где  $K_I$  – некоторый постоянный коэффициент интегрирования.

Соответственно, **передаточная функция регулятора** равна:

$$W_{\text{рег}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_I \cdot \frac{1}{s}. \quad (70)$$

Для реализации И-закона регулирования в схему САР в состав устройства управления либо исполнительного устройства должен быть введен интегрирующий элемент. Таким элементом может

быть, например, интегрирующий усилитель, электрическая схема которого приведена на рис. 13, а. Сигнал на выходе такого усилителя пропорционален интегралу от входного сигнала:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^t u_{\text{ВХ}}(\tau) \cdot d\tau. \quad (71)$$

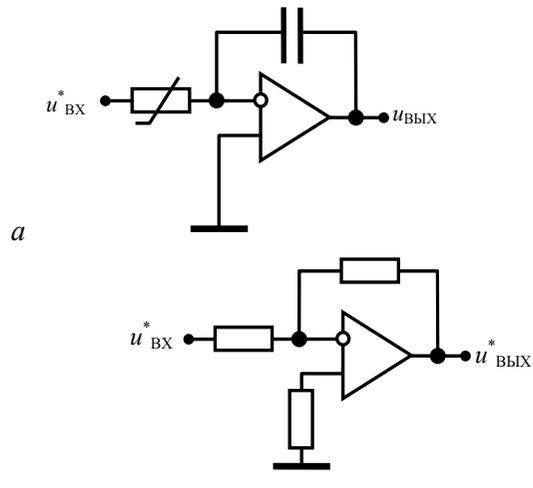


Рис. 13. Электрическая схема интегрирующего (а) и инвертирующего (б) усилителя

Для компенсации знака “-” в (71), т. е. для того, чтобы входное и выходное напряжения усилителя совпадали по знаку, к выходу интегрирующего усилителя можно последовательно подключить инвертирующий усилитель, который изменяет на противоположный знак входного сигнала:

$$u_{\text{ВЫХ}}^*(t) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_{\text{ВХ}}^*(t). \quad (72)$$

В итоге получаем <sup>4</sup>:

<sup>4</sup> В качестве дополнительного задания студенту предлагается самостоятельно вывести выражения (71) – (73).

$$u_{\text{ВЫХ}}^*(t) = K_I \cdot \int_0^t u_{\text{ВХ}}(\tau) \cdot d\tau, \quad (73)$$

где  $K_I = \frac{R_2}{R_1 \cdot R \cdot C}$  [с<sup>-1</sup>].

Переходный процесс в САР с И-регулятором характеризуется отсутствием статической ошибки регулирования, наибольшим значением отклонения регулируемой величины от установившегося значения по сравнению с другими законами регулирования, наибольшим временем регулирования.

Главным достоинством интегрального регулятора является отсутствие статической ошибки регулирования.

### Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон)

Для обеспечения устойчивости и качества регулирования САР (нулевая статическая ошибка, высокое быстродействие) используют пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования (ПИД-закон).

При формировании управляющего сигнала в соответствии с ПИД-законом учитываются:

- значение сигнала ошибки;
- интеграл от сигнала ошибки;
- скорость изменения (производная) сигнала ошибки;

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + K_d \cdot \frac{de}{dt}. \quad (74)$$

**Пропорциональная составляющая** вырабатывает выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения, наблюдаемому в данный момент времени. Он тем больше, чем больше это отклонение. Если входной сигнал равен заданному значению, то выходной равен нулю. Однако при использовании только пропорционального регулятора регулируемая

величина никогда не стабилизируется на заданном значении: существует статическая ошибка.

**Интегральная составляющая** пропорциональна интегралу от сигнала рассогласования. Ее используют для устранения статической ошибки. Она позволяет регулятору со временем учесть статическую ошибку. Если система не испытывает внешних возмущений, то через некоторое время регулируемая величина стабилизируется на заданном значении, сигнал пропорциональной составляющей будет равен нулю, а выходной сигнал будет полностью обеспечивать интегральная составляющая.

**Дифференциальная составляющая** пропорциональна темпу изменения сигнала рассогласования и предназначена для противодействия отклонениям от целевого значения, которые прогнозируются в будущем. Отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему.

Устройство управления, функционирующее на основе ПИД-закона, называется **ПИД-регулятором**. ПИД-регулятор был изобретен в 1910 г., позже, в 1942 г., Зиглер и Никольс разработали методику его настройки, а после появления микропроцессоров в 1980-х гг. развитие ПИД-регуляторов происходит нарастающими темпами. ПИД-регулятор относится к наиболее распространенному типу регуляторов. Около 90–95 % регуляторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют ПИД-закон регулирования.

### Синтез САУ на основе ПИД-регулятора

В теории автоматического управления можно выделить две характерные задачи:

1) в заданной САУ найти и оценить переходные процессы – это задача **анализа** САУ;

2) по заданным переходным процессам и основным показателям разработать САУ – это задача **синтеза** САУ.

Задача синтеза САУ является гораздо более сложной по сравнению с задачей анализа, так как для задачи синтеза возможно множество вариантов решений. Поэтому обычно задача синтеза САУ ставится ограниченно. Считается, что основная часть системы уже задана и требуется синтезировать устройство управления, то есть

выбрать закон регулирования и настроить его параметры. При этом необходимо, чтобы обеспечивался требуемый запас устойчивости, точность управления в установившихся режимах и качество управления в динамических режимах.

Задача синтеза САУ на основе ПИД-регулятора состоит в определении значений коэффициентов  $K_p$ ,  $K_I$  и  $K_d$ , при которых обеспечивается требуемое качество регулирования САУ. С появлением ЭВМ и развитием методов и систем компьютерного моделирования решение данной задачи значительно облегчилось.

В 1942 г. был разработан метод настройки ПИД-регулятора – метод Зиглера-Никольса, названный по именам разработавших его ученых. Данный метод широко используется и в настоящее время.

Суть **метода Зиглера-Никольса** состоит в следующем:

1. Всем трем коэффициентам присваивается нулевое значение:  $K_p = 0$ ,  $K_I = 0$ ,  $K_d = 0$ .
2. Значение коэффициента  $K_p$  постепенно увеличивается с некоторым шагом (при этом необходимо следить за тем, как изменяется реакция системы, т. е. вид переходной функции) до тех пор, пока в системе не начнут наблюдаться незатухающие колебания, т. е. пока система не потеряет устойчивость.
3. Запоминается текущее значение  $K_p$  (обозначим его  $K_u$ ) и измеряется период колебаний системы  $T_u$ .
4. Полученные значения  $K_u$  и  $T_u$  используются для расчета всех параметров ПИД-регулятора по следующим формулам (для непрерывного ПИД-регулятора):

$$K_p = 0,6 \cdot K_u;$$

$$K_I = 2 \cdot \frac{K_u}{T_u}; \quad (75)$$

$$K_d = \frac{K_u \cdot T_u}{8}.$$

5. Для дискретных ПИД-регуляторов необходимо еще учесть период дискретизации –  $\Delta t$ :

$$K_p = 0,6 \cdot K_u ;$$

$$K_I = 2 \cdot \frac{K_u}{T_u} \cdot \Delta t ; \quad (76)$$

$$K_d = \frac{K_u \cdot T_u}{8 \cdot \Delta t} .$$

Основным достоинством метода Зиглера-Никольса является простота выполнения настройки, особенно, учитывая возможность компьютерного моделирования работы САР. Данный метод годится для грубой настройки и «быстрого» введения оборудования в эксплуатацию.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ И ПОЛУЧЕНИЕ ИХ СТАТИЧЕСКИХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

**Цель работы:** освоить методики получения математического описания, статических и частотных характеристик линейных звеньев.

### **Задание:**

1. Изучить математическое описание линейных звеньев.
2. Получить опытным путем статическую характеристику звена на лабораторной установке.
3. Рассчитать статическую характеристику звена.
4. Построить полученные статические характеристики опытным и расчетным путем в одних координатах.
5. Сделать выводы о соответствии полученных статических характеристик опытным и расчетным путем.
6. Получить опытным путем частотные характеристики звена на лабораторной установке.
7. Рассчитать частотные характеристики звена.
8. Построить полученные частотные характеристики опытным и расчетным путем в одних координатах.
9. Сделать выводы о соответствии полученных частотных характеристик опытным и расчетным путем.

### **Аппаратура, используемая в лабораторной работе**

На панели лабораторных работ (рис. 14) лабораторной установки расположена схема исследуемого звена (рис. 15). Для измерения входного  $U_1$  и выходного  $U_2$  сигналов звена используется двухканальный электроннолучевой осциллограф. Для коммутации исследуемой схемы с источниками входных сигналов используется комплект проводов с наконечниками.

### **Порядок выполнения работы**

#### **I. Получение статической характеристики звена**

1. Проводом с наконечниками соединить гнездо «U1» панели лабораторных работ с гнездом «1» исследуемой схемы.

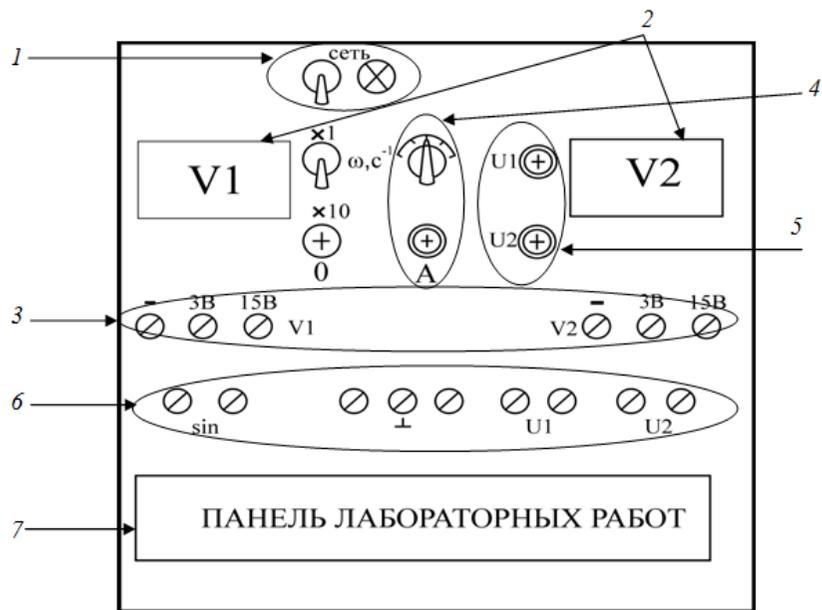


Рис. 14. Лабораторная установка для выполнения лабораторной работы № 1: 1 – тумблер и сигнальная лампа «Сеть» предназначен для включения и индикации наличия питания; 2 – вольтметры «V1» и «V2»; 3 – гнезда входов вольтметров с пределами измерений 15 В или 3 В; 4 – переключатель выбора частоты « $\omega, c^{-1}$ » и ручка плавного регулирования амплитуды напряжения «А»; 5 – ручки регулирования уровней напряжения для первого источника – «U1»; для второго – «U2»; 6 – гнезда выходов генератора синусоидального напряжения обозначены «sin» и гнезда выходов первого и второго источников питания обозначены соответственно «U1» и «U2»; 7 – панель лабораторных работ

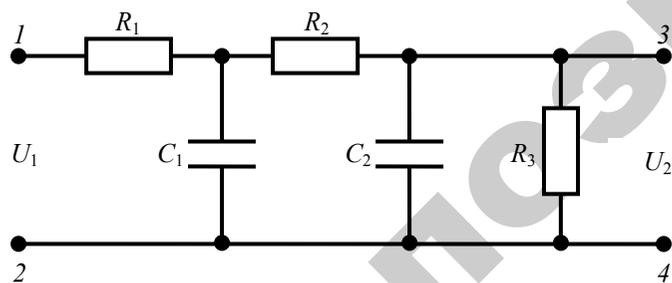


Рис. 15. Исследуемая схема:  $U_1$  – входное воздействие;  $U_2$  – выходная величина

2

2. Подключить первый канал двухканального осциллографа ко второму гнезду «U1» и гнезду « $\perp$ ». Второй канал осциллографа подключить к точкам «3» и «4».

3. Включить стенд и осциллограф.

4. Для снятия статической характеристики, вращая ручку «U1», подавать на схему последовательно напряжения  $U_1$ : -6; -4; -2; 0; +2; +4; +6 В, определяя значение поданных напряжений по экрану осциллографа. После окончания переходного процесса для каждого значения  $U_1$  по экрану осциллографа определить выходные напряжения  $U_2$ . Данные опытов занести в табл. 2.

5. Построить экспериментальную статическую характеристику  $U_2 = f(U_1)$  звена. Рассчитать по ней значение коэффициента передачи  $K = \Delta U_2 / \Delta U_1$ . Его значение занести в табл. 2.

Таблица 2

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

Величины	Значения						
$U_1, В$	-6	-4	-2	0	2	4	6
$U_2, В$							
$U_{2P}, В$							
$K$							
$K_{рас}$							

6. Рассчитать на основании уравнения (40) коэффициент передачи звена:  $K_{рас} = \frac{R_3}{(R_1 + R_2 + R_3)}$ .

Расчетное значение коэффициента  $K_{рас}$  занести в табл. 2.

Рассчитать статическую характеристику  $U_2 = K_{рас} \cdot U_1$ . Результаты занести в табл. 2.

7. В одних координатах с экспериментальной построить расчетную статическую характеристику  $U_{2P} = K_{рас} \cdot U_1$  звена.

Сделать выводы о соответствии экспериментальной и расчетной статических характеристик друг другу.

## II. Получение частотных характеристик звена

1. Проводом с наконечниками соединить гнездо «sin» с гнездом «1» исследуемой схемы.

2. Подключить первый канал осциллографа ко второму гнезду «sin» и гнезду «1».

3. Для снятия частотных характеристик переключателем « $\omega, c^{-1}$ » выбрать частоту. Ручкой «A» выбрать амплитуду входного сигнала  $A_x = 4 \dots 6$  В. Скорость развертки осциллографа выбрать такую, чтобы на его экране умещалось не менее периода колебаний. По экрану осциллографа измерить амплитуды  $A_x$  входного и  $A_y$  выходного сигналов. Результаты измерений занести в табл. 3. Одновременно по экрану осциллографа измерить разность фаз  $\varphi_n(\omega)$  и период  $T_n$  выходного сигнала в единицах горизонтальной шкалы экрана (количество делений на шкале). Результаты занести в графу  $\varphi_n$  и  $T_n$  табл. 3. Последовательно выбирая частоты переключателем « $\omega, c^{-1}$ », провести измерения на всех частотах.

4. Рассчитать АЧХ по формуле  $A(\omega) = A_y / A_x$ . Результаты расчетов для всех частот занести в табл. 3, дополнив их значениями  $A(0)$  при  $\omega = 0$  и  $A(\omega)$  при  $\omega = \infty$ , полученными по теоретической зависимости (44).

5. Периоду колебаний соответствует разность фаз в радианах, равная  $2\pi$ . Поэтому разность фаз в опытах можно рассчитать из пропорции  $\frac{\varphi(\omega)}{\varphi_n} = \frac{2 \cdot \pi}{T_n}$ :

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

Результат расчетов также занести в табл. 3.

6. Расчет теоретических значений  $A(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$  провести по формулам (44) и (45), предварительно рассчитав  $T_1$ ,  $T_2$  и  $K$  по уравнению (40). Номиналы сопротивлений и емкостей взять по схеме на панели лабораторной работы. Результаты занести в графы  $A_p(\omega)$  и  $\varphi_p(\omega)$ .

7. В одних координатах построить экспериментальные и теоретические (расчетные) АЧХ, ФЧХ и АФЧХ. Сделать выводы о соответствии экспериментальных характеристик теоретическим (расчетным).

Таблица 3

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

Величины	Значения					
	0					$\infty$
$\omega, c^{-1}$						
$A_x, В$						
$A_y, В$						
$A(\omega)$						
$A_p(\omega)$						
$T_n$						
$\varphi_n$						
$\varphi(\omega)$						
$\varphi_p(\omega)$						

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Результаты эксперимента и расчетов (табл. 2).
3. Графики экспериментальной и расчетной статических характеристик.
4. Вывод о соответствии экспериментальной статической характеристики расчетной.
5. Результаты эксперимента и расчетов (табл. 3).
6. Графики экспериментальных и расчетных АЧХ, ФЧХ и АФЧХ.
7. Выводы о соответствии экспериментальных частотных характеристик расчетным.

### Контрольные вопросы

1. Дать определения: звено, линейное звено.
2. Дать определение статической характеристики.
3. Дать определения: АЧХ, ФЧХ, АФЧХ.
4. Как называется график АФЧХ? Как он строится?
5. Изложить методику получения статических и частотных характеристик линейных звеньев теоретическим и экспериментальным методами.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ

**Цель работы:** освоить методику моделирования статических и частотных характеристик линейных звеньев.

### Задание:

1. Создать компьютерную модель исследуемого звена в Simulink для получения статической характеристики.
2. Построить график статической характеристики, полученной путем моделирования.
3. Создать компьютерную модель исследуемого звена в Simulink для получения частотных характеристик.
4. Построить графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ, полученных путем моделирования.
5. Сделать выводы о соответствии полученных характеристик экспериментальным.

### Аппаратура, используемая в лабораторной работе

В данной лабораторной работе для компьютерного моделирования заданной электрической схемы используется система компьютерного моделирования (СКМ) MATLAB и входящий в ее состав пакет моделирования Simulink.

1. Для запуска Simulink необходимо сначала запустить MATLAB из главного меню Windows Пуск → Все программы → Matlab6.5 либо путем двойного щелчка мышью на соответствующей иконке на рабочем столе. Основное окно MATLAB показано на рис. 16.

Данное окно содержит три подокна: **Command Window** – окно для ввода формул и команд; **Command History** – окно, отображающее ранее введенные команды; окно **Workspase** – отображает рабочее пространство, т. е. используемые в работе переменные, константы, массивы и другие объекты, а также их размеры в байтах. В начале работы все три подокна пусты.

2. Запустить пакет Simulink из MATLAB одним из двух способов:
- в окне ввода команд **Command Window** в строке ввода (справа от знака `>>`) набрать `simulink` и нажать клавишу ввода;

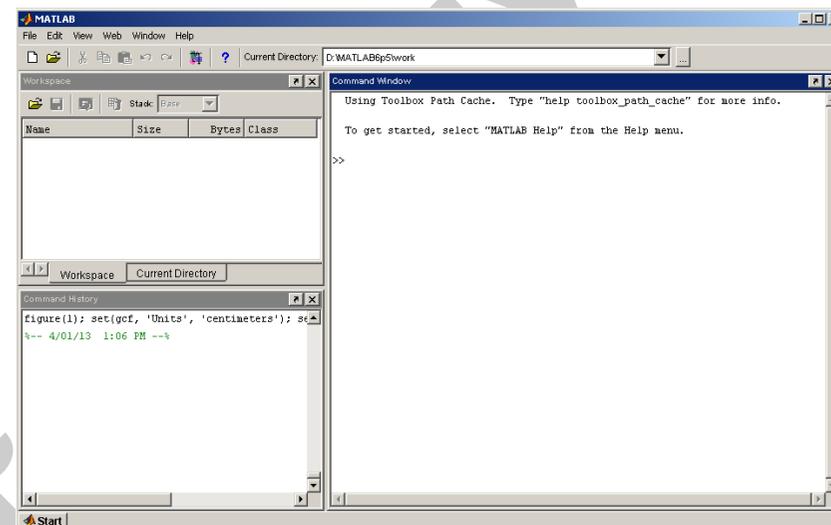


Рис. 16. Вид основного окна системы компьютерного моделирования MATLAB

– на панели инструментов MATLAB левой клавишей мыши нажать кнопку .

В результате будет открыто **Simulink Library Browser** – окно интегрированного обозревателя (браузера) библиотеки стандартных блоков Simulink (показано на рис. 17). В данном окне содержится дерево компонентов библиотеки блоков Simulink. Библиотека блоков включает следующие основные разделы:

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

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

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

или нажать на клавиатуре комбинацию клавиш **Ctrl+N**, или левой клавишей мыши на панели инструментов окна **Simulink Library**

**Brouser** нажать кнопку . В результате на экране появится новое чистое окно редактирования графической модели моделируемой системы или устройства.

Вид данного окна, имеющего по умолчанию имя **untitled**, также показан на рис. 17.

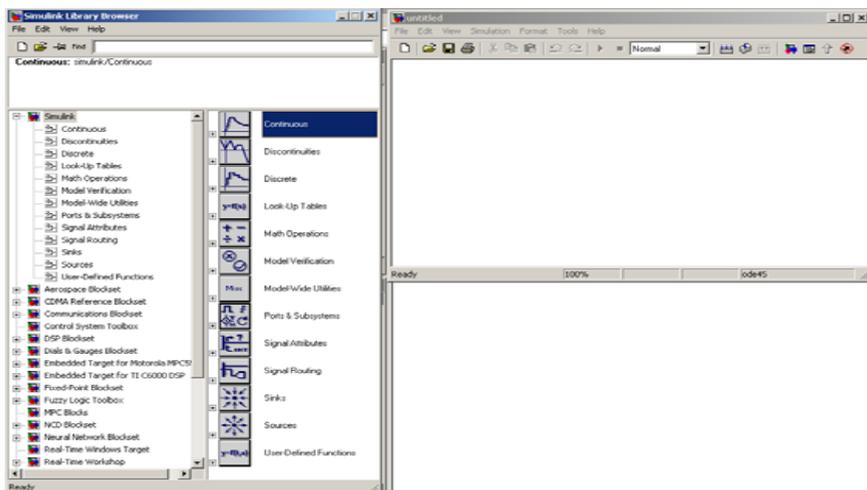


Рис. 17. Окно браузера библиотек Simulink

## Порядок выполнения работы

### I. Построение компьютерной модели заданной схемы в Simulink

Запустить систему компьютерного моделирования (СКМ) **MATLAB** и входящий в ее состав пакет моделирования **Simulink**. Открыть окно создания новой модели. В этом окне создать графическую модель заданной электрической цепи, как описано ниже. Приблизительный вид создаваемой графической модели показан на рис. 18.

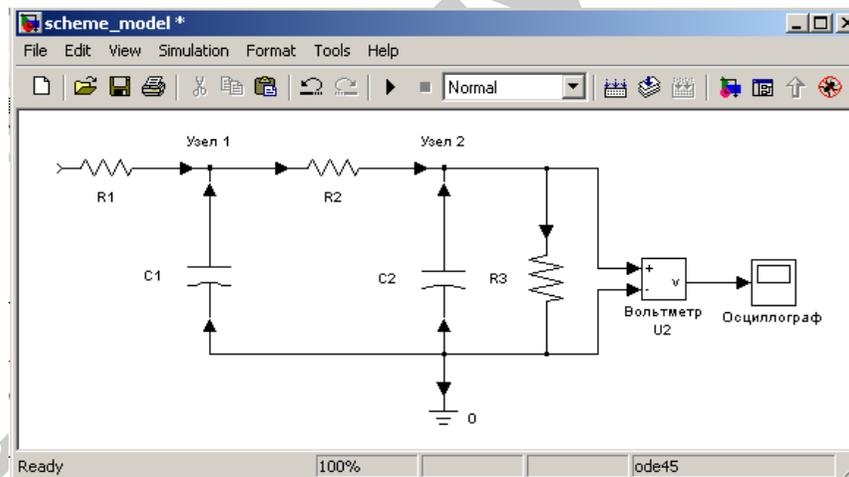


Рис. 18. Графическая модель заданной электрической цепи

1. **Сопротивление  $R_1$** . В окне **Simulink Library Brouser** в библиотеке **SimPowerSystems** на вкладке **Elements** найти блок **Series RLC Branch**, выделить его левой клавишей мыши и, не отпуская ее, перетащить данный компонент в окно редактирования модели **untitled**. Данный блок представляет собой последовательное соединение активного сопротивления  $R$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$ , однако, задав соответствующие параметры блока, можно моделировать каждый из этих трех элементов в отдельности. Необходимо задать параметры блока. Для этого левой клавишей мыши следует дважды щелкнуть по нему. В появившемся окне **Block Parameters: Series RLC Branch** нужно ввести следующие значения параметров: для параметра **Resistance R (Ohms)** – значение сопротивления  $R_1$ ; для параметра **Inductance L (H)** – нулевое значение индуктивности  $0$ ; для параметра **Capacitance C (F)** – значение электрической емкости  $\text{inf}$ , равное бесконечности. Нажатием кнопок **Apply** и **OK** закрепить введенные параметры блока. В результате значок блока изменится и примет вид, соответствующий только одному активному сопротивлению. Название блока по умолчанию автоматически задано как **Series RLC Branch** и отображается под ним. Для задания названия блока следует щелкнуть левой клавишей мыши по надписи **Series RLC Branch**, войти в строку редактирования надписи

и заменить надпись **Series RLC Branch** на **R1**; выход из строки редактирования надписи осуществляется щелчком левой клавиши мыши на свободном пространстве окна **untitled**.

2. **Конденсатор  $C_1$** . Для моделирования конденсатора также используется блок **Series RLC Branch**. Как и в предыдущем случае, необходимо выделить его левой клавишей мыши в окне **Simulink Library Browser** в библиотеке **Sim Power Systems** на вкладке **Elements** и перетащить данный блок в окно редактирования модели **untitled**. Для задания параметров блока левой клавишей мыши выполнить двойной щелчок по нему и в появившемся окне **Block Parameters: Series RLC Branch** задать следующие значения параметров: для параметра **Resistance R (Ohms)** – нулевое значение сопротивления 0; для параметра **Inductance L (H)** – нулевое значение индуктивности 0; для параметра **Capacitance C (F)** – значение электрической емкости, соответствующее значению емкости  $C_1$  на лабораторном стенде. Нажатием кнопок **Apply** и **OK** закрепить введенные параметры блока. В результате значок блока изменится и примет вид, соответствующий только одному конденсатору. Для задания названия блока щелкнуть левой клавишей мыши по надписи **Series RLC Branch**, войти в строку редактирования надписи и заменить надпись **Series RLC Branch** на **C1**; для выхода из строки редактирования надписи щелкнуть левой клавишей мыши на свободном пространстве окна **untitled**. Далее, для поворота значка конденсатора, чтобы он располагался вертикально, необходимо щелкнуть по нему один раз правой клавишей мыши и в появившемся всплывающем меню выбрать сначала пункт **Format** → **Rotate block**, а затем точно также – пункт **Format** → **Flip block**.

3. **Сопротивления  $R_2$ ,  $R_3$  и емкость  $C_2$**  задать аналогично.

4. Для **соединения** блоков **R1**, **C1** и **R2** используется блок **T connector**, расположенный на вкладке **Connectors** в библиотеке **SimPower-Systems** в окне **Simulink Library Browser**. Следует перетащить его левой клавишей мыши в окно редактирования модели **untitled**, щелкнуть по нему правой клавишей мыши и во всплывающем меню выбрать пункт **Format** → **Show name**, в результате над значком элемента появится его название **T connector**, заданное автоматически. Изменить название блока с **T connector** на **Узел 1**. Далее выполнить соединение элементов. Подвести курсор мыши к выходу блока **R1** и, нажав левую клавишу мыши, соединить

выход **R1** с левым входом блока **Узел 1**. Аналогичным образом соединить выход блока **C1** с нижним входом блока **Узел 1**, а выход **Узел 1** – с входом блока **R2**.

5. **Соединение** блоков **R2**, **C2** и **R3** выполнить таким же образом, с использованием еще одного блока **T connector**, которому присвоить название **Узел 2**.

6. Выход блока **R3** соединить со входом блока **C1**. На получившейся соединительной линии щелкнуть правой клавишей мыши, во всплывающем окне выбрать пункт **Signal Properties** и в появившемся окне в поле **Signal name** в качестве названия сигнала ввести 0 (эта линия – **нулевая** – соответствует нулевому потенциалу). После этого левой клавишей мыши соединить вход блока **C2** с нулевой линией. Далее на вкладке **Connectors** в библиотеке **SimPowerSystems** в окне **Simulink Library Browser** выбрать блок **Ground (input)** и перетащить его в окно редактирования модели **untitled**. Отобразить название блока, щелкнув по нему правой клавишей мыши и выбрав пункт **Format** → **Show name** всплывающего меню, и изменить название с **Ground (input)** на 0. После этого вход блока 0 левой клавишей мыши соединить с нулевой линией.

7. **Вольтметр**. На вкладке **Measurements** в библиотеке **SimPower-Systems** в окне **Simulink Library Browser** выбрать блок **Voltage-Measurement** (блок измерения напряжения) и перетащить его в окно **untitled**. Начальное название элемента изменить на **Вольтметр U2**. Вход «+» вольтметра соединить с линией между блоками **Узел 2** и **R3**, а вход «-» с нулевой линией.

8. **Осциллограф**. На вкладке **Sinks** в библиотеке **Simulink** в окне **Simulink Library Browser** выбрать блок **Scope** и перетащить его в окно **untitled**. Название блока **Scope** заменить на **Осциллограф**. Выход блока **Вольтметр U2** соединить со входом блока **Осциллограф**. Двойным щелчком левой клавиши мыши на значке блока **Осциллограф** открыть окно **Осциллограф**, моделирующее экран реального осциллографа (рис. 19).

9. **Источник постоянного напряжения**. На вкладке **Electrical Sources** в библиотеке **SimPowerSystems** в окне **Simulink Library Browser** выбрать блок **DC Voltage Source** (источник постоянного напряжения) и перетащить его в окно **untitled**. Название блока **DC Voltage Source** изменить на **U1**. Вход блока **U1** соединить с нулевой линией.

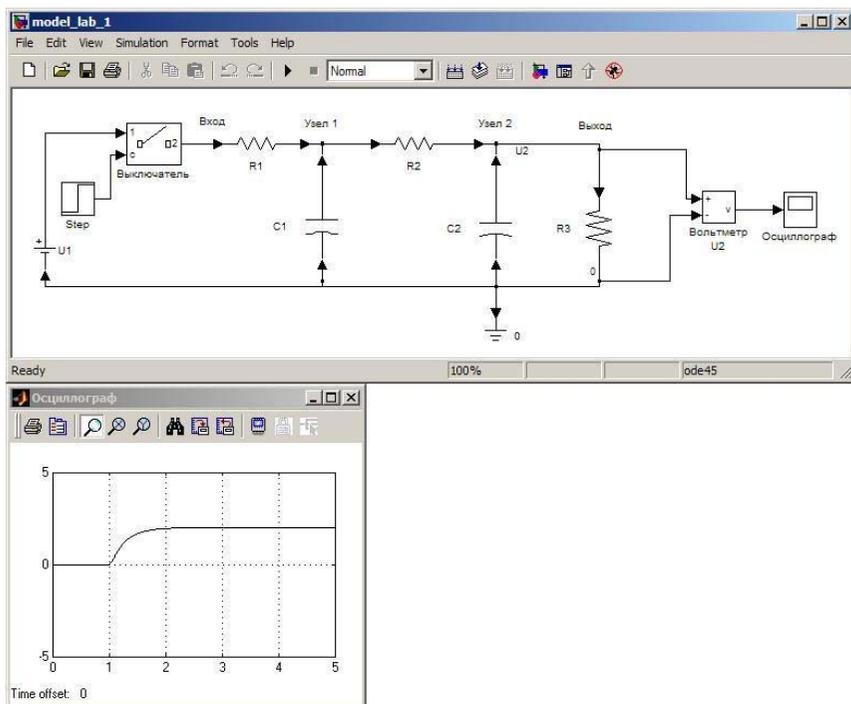


Рис. 19. Получение статической характеристики звена

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

11. Перетащить блок Breaker в окно untitled и изменить название с Breaker на Выключатель. Двойным щелчком левой клавиши мыши на значке блока открыть окно задания его параметров и для параметра Snubber resistance Rom (Ohms) (сопротивление выключателя

в разомкнутом состоянии) вместо значения  $10^6$  ввести inf (бесконечность), после чего нажать кнопки Apply и OK. Входной контакт выключателя «1» соединить с выходом источника напряжения U1, а выходной контакт «2» – со входом блока резистора R1.

12. **Ступенчатое входное воздействие.** Для замыкания выключателя используется блок Step на вкладке Sources в библиотеке Simulink. Данный блок моделирует ступенчатое изменение сигнала. Перетащить его левой клавишей мыши в окно untitled и соединить с управляющим входом «с» выключателя. Выполнить двойной щелчок левой клавиши мыши на блоке Step и открыть окно задания его параметров. В соответствии с заданными по умолчанию значениями параметров, сигнал на выходе блока будет изменяться от начального значения (Initial value) 0 до конечного значения (Final value) 1 в момент времени (Step time) 1 с от начала процесса моделирования. Оставить все параметры блока Step без изменения и нажать кнопку OK.

13. **Сохранить** созданную модель, выбрав в меню окна редактирования модели untitled пункт File → Save as... Вид окна с созданной моделью электрической цепи и окна осциллографа показан на рис. 19.

## II. Получение статической характеристики звена

1. Выполнить моделирование схемы. Для этого сначала задать значение постоянного напряжения  $U_1$ , подаваемого на вход цепи. Двойным щелчком левой кнопки мыши на блоке источника напряжения U1 открыть окно задания его параметров и в поле для параметра Amplitude (V) – напряжение источника в вольтах – ввести значение 2. Подтвердить ввод нажатием кнопок Apply и OK.

2. В меню окна редактирования модели выбрать пункт Simulation → Simulation parameters, в появившемся окне задания параметров моделирования на вкладке Solver в поле Stop time (время окончания моделирования, вводится в секундах) ввести значение 5, а на вкладке Workspace I/O отключить флажок Limit data point to last. Нажать кнопки Apply и OK. В окне осциллографа в меню быстрого

доступа нажать кнопку Parameters  (справа от значка принтера) и в появившемся окне параметров осциллографа на вкладке Data

history отключить флажок Limit data point to last. Нажать кнопки Apply и OK.

3. В меню окна редактирования модели выбрать пункт Simulation → Start, в результате чего начнется процесс моделирования. При этом на экране появится предупреждающее сообщение о том, что созданная модель содержит нелинейные элементы (это относится к блоку выключателя Breaker), и поэтому для корректного моделирования необходимо использовать компьютерные методы решения дифференциальных уравнений «ode23tb» либо «ode15s». Таким образом, Simulink запрашивает на это разрешение пользователя. Следует нажать кнопку OK.

Результатом моделирования является график изменения напряжения  $U_2$  на выходе цепи, отображаемый в окне осциллографа (рис. 19). Как видно из графика, в момент времени  $t = 1$  с от начала моделирования замыкается выключатель и постоянное входное напряжение 2 В подается на вход электрической цепи. В цепи начинается переходный процесс, после окончания которого значение выходного напряжения  $U_2$  принимает некоторое установившееся значение.

4. Для определения статической характеристики звена следует изменять значения постоянного входного напряжения  $U_1$  от -6 до +6 В с шагом 2 В и для каждого значения  $U_1$  путем моделирования определить соответствующее установившееся значение выходного напряжения  $U_2$ .

Данные опытов занести в табл. 4. Построить статическую характеристику  $U_2 = f(U_1)$  звена по результатам компьютерного моделирования. Рассчитать по ней значение коэффициента передачи  $K_{км} = \Delta U_2 / \Delta U_1$ . Его значение занести в табл. 4.

Таблица 4  
Данные для построения статической характеристики звена

Величины	Значения						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
$U_1, \text{В}$							
$U_{2 \text{ км}}, \text{В}$							
$K_{км}$							

### III. Получение АЧХ и ФЧХ звена

1. Для моделирования подачи гармонического напряжения на вход исследуемой электрической цепи необходимо изменить разработанную модель (рис. 19) следующим образом:

1.1. Удалить блоки: блок U1 источника постоянного напряжения, блок Выключатель, блок Step подачи ступенчатого управляющего сигнала. Удалить блок из схемы можно одним из двух способов:

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

1.2. На место удаленных блоков нужно вставить источник переменного гармонического напряжения. Для этого на вкладке Electrical Sources в библиотеке SimPowerSystems в окне Simulink Library Browser выбрать блок AC Voltage Source (источник переменного напряжения) и перетащить его в окно с моделируемой схемой. Название блока AC Voltage Source изменить на U1. Вход блока U1 соединить с нулевой линией, а выход – со входом блока R1. Задать параметры источника U1. Двойным щелчком левой клавиши мыши по нему открыть окно задания параметров блока Block parameters: U1 и в полях Peak amplitude (V) и Frequency (Hz) ввести значения, соответственно, амплитуды (в вольтах) и частоты (в герцах) гармонического сигнала. Подтвердить ввод нажатием кнопок Apply и OK.

1.3. Запустить процесс моделирования (пункт меню Simulation → Start), получим, что в окне осциллографа отобразится гармонический сигнал – изменение напряжения U2 на выходе цепи (рис. 20).

2. Для получения частотных характеристик исследуемой цепи используется специальный блок Powergui, расположенный в библиотеке SimPowerSystems. Данный блок содержит в себе несколько полезных инструментов для выполнения анализа электрических схем (расчет схемы векторным методом, расчет установившегося режима в схеме, расчет частотных характеристик и т. д.). Поместить блок Powergui в окно с исследуемой схемой (на рис. 20 он обозначен как Powergui-Continuous).

Затем выполнить по нему двойной щелчок левой клавиши мыши, в результате чего откроется окно (название окна совпадает

с именем файла созданной модели), отображающее все инструменты анализа, входящие в блок Powergui. Для открытия инструмента LTI-Viewer<sup>5</sup> выполнить щелчок левой клавиши мыши на кнопке Use LTI-Viewer, а затем – на кнопке Open new LTI-Viewer.

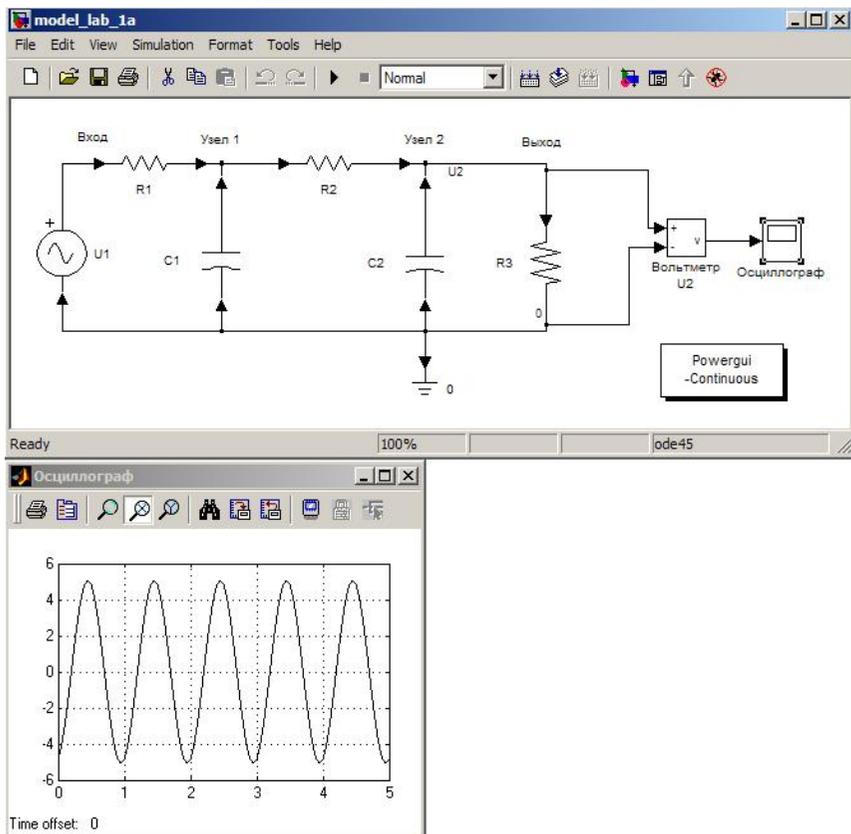


Рис. 20. Получение частотных характеристик звена

<sup>5</sup> LTI-Viewer (анализатор линейных стационарных систем) – это инструмент для анализа линейных стационарных систем (LTI – значит linear time-invariant). Анализируемая электрическая схема, как следует из ее математического описания (41), является линейной схемой. Кроме того, так как емкости резисторов и сопротивления конденсаторов неизменны во времени, а, следовательно, неизменны во времени и коэффициенты  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  в формуле (41), то данная электрическая схема является также стационарной.

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

2.2. Для получения графика АФЧХ исследуемой схемы щелкнуть по одному из графиков правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выбрать пункт Plot Types → Nyquist. Далее повторить щелчок правой клавишей мыши по полученному графику и в пункте меню Show → Negative Frequencies убрать галочку.

2.3. Полученные графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ перенести в отчет и сравнить с полученными ранее экспериментальными и расчетными графиками.

## Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Компьютерная модель исследуемого звена, созданная в Simulink для моделирования статической характеристики.
3. Результаты компьютерного моделирования (табл. 4).
4. График статической характеристики.
5. Компьютерная модель исследуемого звена, созданная в Simulink для моделирования частотных характеристик.
6. Графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ, полученных путем моделирования.
7. Выводы о соответствии полученных характеристик экспериментальным и расчетным характеристикам, полученным при выполнении лабораторной работы № 1.

### Контрольные вопросы

1. Что такое типовое воздействие? Какие типовые воздействия вы знаете? Какие из них были использованы при выполнении лабораторной работы?

2. Дать определения переходного и установившегося режимов работы звена (системы).

3. Что относится к временным характеристикам систем и звеньев. Дать определение переходной функции и импульсной переходной функции.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ГЛАДКИХ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

**Цель работы:** освоить методику линейаризации гладких нелинейных характеристик звеньев систем автоматизации на примере моста, как устройства сравнения.

#### Задание:

1. Изучить методы линейаризации.
2. Получить линейаризованное уравнение моста аналитическим методом.
3. Опытным путем получить статическую характеристику моста.
4. Построить график статической характеристики моста.
5. Получить линейаризованное уравнение моста графоаналитическим методом.
6. Сделать выводы о соответствии линейаризованных статических характеристик.

#### Аппаратура, используемая в лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы используется лабораторный стенд (рис. 14), содержащий схему резистивного моста (рис. 21). Для имитации датчика ( $R_d$ ) и задатчика ( $R_{зАд}$ ) используются магазины сопротивлений. Для коммутации магазинов сопротивлений в мостовую схему и соединения моста с вольтметрами стенда используются провода с наконечниками.

Значение сопротивления  $R_{д0}$  датчика, при котором будет проводиться линейаризация, указывается преподавателем.

#### Порядок выполнения работы

##### I. Линейаризация моста аналитическим методом

Включить стенд и измерить напряжение питания моста  $U_{п}$  (рис. 21) с помощью вольтметра стенда. Рассчитать коэффициент передачи  $K_M$  моста по формуле (50). Выключить стенд. Записать линейаризованное уравнение моста.

Экспериментальная зависимость напряжения на выходе моста от изменения сопротивления датчика

Величины	Значения					
$R_{д}$ , Ом				...		
$U_{м}$ , В				...		

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Расчет коэффициента передачи моста аналитическим методом.
3. Линеаризованное уравнение моста, полученное аналитическим методом.
4. Расчет  $R_{зАд}$  при  $R_{д} = R_{д0}$ .
5. Экспериментальные данные (табл. 5).
6. Графики нелинейной статической характеристики и линеаризованных статических характеристик, полученных двумя методами.
7. Расчет коэффициента передачи моста на основе графоаналитического метода.
8. Линеаризованное уравнение моста, полученное графоаналитическим методом.
3. Выводы о соответствии линеаризованных статических характеристик, полученных аналитическим и графоаналитическим методами.

### Контрольные вопросы

1. Дать определение линеаризации непрерывно дифференцируемых (гладких) характеристик элементов автоматики.
2. Перечислить методы линеаризации гладких нелинейных характеристик.
3. Изложить порядок линеаризации аналитическим методом.
4. Изложить порядок линеаризации путем графоаналитической обработки экспериментально полученной нелинейной характеристики.

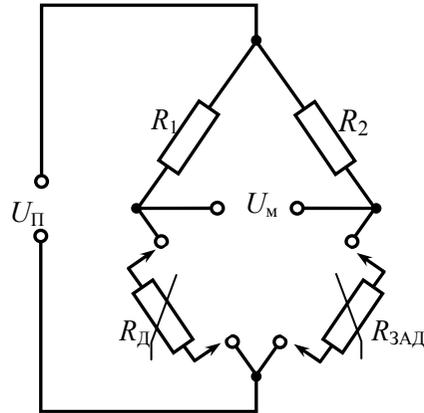


Рис. 21. Схема исследуемого резистивного моста

## II. Линеаризация моста по экспериментальным данным

1. Подсоединить к схеме на панели лабораторных работ магазины, имитирующие датчик и задатчик (рис. 21). Подсоединить выход моста ( $U_{м}$ ) к вольтметру стенда. Установить на соответствующем магазине сопротивление  $R_{д0}$ .

2. Включить питание лабораторной установки и сбалансировать мост магазином, имитирующим задатчик. Убедиться, что мост балансируется при соответствующем сопротивлении задатчика. Для этого рассчитать  $R_{зАд}$  по формуле (51) при  $R_{д} = R_{д0}$ . Совпадение результатов подтвердит, что задатчик действительно задает соответствующее значение регулируемой величины.

3. Изменяя сопротивление  $R_{д}$  датчика от 0 до 4 кОм через 200 Ом и от 4 кОм до 9 кОм через 1 кОм, снять зависимость  $U_{м}(R_{д})$ . Результаты занести в табл. 5.

4. Построить график этой зависимости. Провести касательную в точке баланса моста. Перенести координаты в точку линеаризации. Рассчитать коэффициент  $K_{м}$  моста как отношение  $K_{м} = \Delta U_{м} / \Delta R_{д}$  для касательной.

5. Записать линеаризованное уравнение моста.

6. Построить на этом же графике график линеаризованной статической характеристики моста, полученной аналитическим методом.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

**Цель работы:** освоить методику приближенной идентификации объекта управления по виду переходной функции, методику идентификации с использованием ЭВМ.

### Задание:

1. Изучить методику проведения идентификации объектов.
2. Получить график экспериментальной переходной функции сушильного шкафа.
3. Рассчитать передаточную и переходную функции сушильного шкафа с указанием типа звена.
4. Построить график расчетной переходной функции сушильного шкафа с указанием максимального расхождения между расчетной и экспериментальной кривыми.
5. Получить передаточную функцию сушильного шкафа и значения постоянных времени звена путем компьютерной идентификации.
6. Построить график расчетной переходной функции сушильного шкафа, полученной в результате компьютерной идентификации.
7. Выводы о соответствии передаточных функций, полученных в результате расчетов и компьютерной идентификации.

### Аппаратура, используемая в лабораторной работе

В качестве объекта идентификации используется учебный сушильный шкаф типа ШСУ (рис. 22), имеющий объем сушильной камеры 10 л и максимальную температуру нагрева 150 °С. Для измерения температуры воздуха внутри шкафа установлена термопара ТХА(К)–1199, предназначенная для измерения температур в диапазоне от –40 до +800 °С. Для возможности передачи данных измерения на компьютер термопара подключена к измерителю-регулятору СОСНА-003МД. Универсальный вход измерителя-регулятора дает возможность подключать без дополнительного согласования термопреобразователи сопротивления, термоэлектрические преобразователи (термопары) и преобразователи с выходными унифицированными сигналами тока или напряжения.



Рис. 22. Шкаф сушильный учебный ШСУ

При включении электронагревателя выделяемая им тепловая мощность скачкообразно изменяется от 0 Вт и составляет около 100 Вт. Температура внутри печи  $\theta$  начинает повышаться. Измеритель СОСНА-003МД выполняет измерение температуры  $\theta$  внутри сушильного шкафа в дискретные моменты времени  $t_k = k \cdot \Delta t$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ), через определенный интервал времени  $\Delta t$ , называемый интервалом дискретизации (например, каждые 3 с). Результаты измерений отображаются на панели измерителя СОСНА-003МД, а также передаются в компьютер и сохраняются в файле в виде таблицы.

### Порядок выполнения работы

#### I. Получение экспериментальной переходной функции

- 1.1. Включить питание стенда выключателем QF.
- 1.2. Закрыть дверцу сушильного шкафа. В начале эксперимента сушильный шкаф должен быть полностью остывшим: температура внутри шкафа должна быть равна наружной температуре. Значение температуры внутри шкафа отображается на панели измерителя СОСНА-003МД.
- 1.3. Запустить компьютерную программу, которая выполняет считывание и сохранение данных о температуре внутри шкафа с измерителя СОСНА-003МД на компьютер. Для этого на компьютере нужно открыть папку «с:\Sosna\_003MD» и запустить на

выполнение файл SysViewAD.exe. На экране компьютера появится окно Начальные установки. Необходимо задать имя файла, в который будут сохраняться данные измерений температуры. Для этого в окне Начальные установки напротив строки «Файл для записи считанных значений: *имя\_файла.arc*» следует левой клавишей мыши нажать кнопку Выбрать. В появившемся диалоговом окне следует указать папку «c:\Sosna\_003MD \Experiments\», в которой будет храниться файл, а в строке Имя файла указать имя файла. Имя файла необходимо набирать английскими символами без пробелов. В качестве имени файла, например, можно задать фамилию студента, выполняющего лабораторную работу. После ввода имени файла левой клавишей мыши нажать кнопку Открыть (при этом на появляющийся запрос, следует ли создать такой файл нужно ответить Да). Далее в окне Начальные установки левой клавишей мыши нажать кнопку Принять.

1.4. В появившемся рабочем окне программы SysView необходимо указать интервал опроса датчика температуры  $\Delta t$ . В верхней части окна слева находится ячейка для ввода значения интервала опроса  $\Delta t$ . Предлагаемое по умолчанию значение равно 10 с. Задать значение интервала опроса равным 5 с, для подтверждения ввода левой клавишей мыши нажать кнопку Установить.

1.5. Включить тумблером сушильный шкаф (рис. 22).

1.6. Измерения проводить до тех пор, пока температура в шкафу изменяется.

1.7. По окончании измерений левой клавишей мыши закрыть окно программы SysView. Выключить тумблером сушильный шкаф.

1.8. Построить график экспериментальной переходной функции сушильного шкафа. Для этого выполнить запуск MATLAB из главного меню Windows Меню Пуск → Все программы → Matlab6.5. В появившемся главном окне программы MATLAB (рис. 16) выбрать пункт меню File → New → M-file. В результате на экране появится окно (с предлагаемым по умолчанию названием Untitled) для ввода последовательности команд. В данном окне с клавиатуры ввести следующий текст программы, выполняющей построение графика переходной функции:

```
clear all;
close all;
```

```
clc;
experiment_data=load('c:\Sosna_003MD\Experiments\file_name.arc');
% загрузка файла с массивом данных эксперимента
y = experiment_data( : , 5); % данные изменения температуры -
                             % 5-й столбец загруженного массива
N = length(y); % длина массива значений температуры
y = y - y(1); % вычитание начального значения температуры
Dt = 3; % интервал опроса
t_beg = 0; % начальное значение времени
t_end = Dt*(N-1); % конечное значение времени
t = [t_beg : Dt : t_end ]';
% массив моментов времени, в которые производились
% измерения температуры
U = 220;
u = U*ones(size(y));
% управляющее воздействие - изменение напряжения
% на нагревательном элементе сушильного шкафа
%-----
% построение графика переходной функции сушильного
шкафа
figure(1);
hold on;
plot( t, y, 'k', 'LineWidth', 2 );
% задание масштаба графика по осям x и y
axis( [ t_beg (t_end+10) 0 100] );
grid on; % отображать сетку графика
xlabel( '\litt, c' ); % подпись по оси x
ylabel( '\ity}{\litt}, c' ); % подпись по оси y
Y_st = y(N); % установившееся значение переходной функции
plot( t, Y_st*ones(size(t)), 'b--', 'LineWidth', 0.5);
legend( '\ity}{\litt}', '\ity}_s_t' );
```

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

1.10. Произвести запуск и выполнение набранной программы, для чего нажать клавишу F5 либо в окне с программой выбрать пункт

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

## II. Выбор звена, которым описывается сушильный шкаф и определение значений параметров передаточной функции этого звена

2.1. Сравнивая экспериментальную переходную функцию с теоретическими переходными функциями, приведенными в табл. 1, определить, какому звену лучше всего соответствует экспериментальная переходная функция. Записать название этого звена и общий вид его передаточной функции.

2.2. Путем графоаналитической обработки экспериментальной переходной функции (как показано в табл. 1) оценить значения параметров передаточной функции выбранного динамического звена. Коэффициент передачи  $K$  рассчитать по формуле

$$K = \frac{Y_{уст}}{u_{вх}}, \quad (77)$$

где  $Y_{уст}$  [°C] – изменение температуры в сушильном шкафу в процессе нагрева;

$u_{вх}$  [В] – изменение входного воздействия, т. е. напряжение, подаваемое на нагревательный элемент при включении сушильного шкафа (в нашем случае 200 В).

2.3. Записать найденные численные значения параметров.

2.4. Построить по приведенным в табл. 1 выражениям расчетную переходную функцию  $y_p(t)$  выбранного звена на одном графике с экспериментальной переходной функцией. Сравнить их. Если максимальное расхождение кривых не более 5 % от изменения температуры  $Y_{уст}$ , то считать, что выбор сделан правильно.

2.5. Для построения графика расчетной переходной функции на одном рисунке с графиком экспериментальной переходной функции в MATLAB в окне с набранной программой построения графика добавить следующий текст:

% построение графика расчетной переходной функции  
% коэффициент преобразования входного сигнала в выходной  
 $K = Y_{st}/U;$

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

2.6. Если по графику установлено, что экспериментальная переходная функция соответствует апериодическому звену 1-го порядка, ввести значение постоянной времени и математическую формулу для переходной функции звена (после символов «T =>» ввести найденное значение постоянной времени).

% для апериодического звена 1-го порядка  
 $T =$  ; % постоянная времени, сек.  
 $h = K*U*(1 - \exp(-t/T));$  % расчетная переходная функция

2.7. Если экспериментальная переходная функция соответствует апериодическому звену 1-го порядка с запаздыванием, ввести значения постоянной времени, времени запаздывания и математическую формулу для переходной функции звена (после символов «T =>» и «tau =>» ввести найденные значения постоянной времени и времени запаздывания, соответственно).

% для апериодического звена 1-го порядка с запаздыванием  
 $T =$  ; % постоянная времени, сек.  
 $\tau =$  ; % время запаздывания, сек.  
 $h = \text{sign}(\text{real}(t > \tau)) * K * U * (1 - \exp(-(t - \tau)/T));$

2.8. Если экспериментальная переходная функция соответствует апериодическому звену 2-го порядка, ввести значения постоянных времени  $T_3$ ,  $T_4$  и математическую формулу для переходной функции звена (после символов «T3 =>» и «T4 =>» ввести найденные значения постоянных времени):

% для апериодического звена 2-го порядка  
 $T3 =$  ;

$$T4 = ;$$

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

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

```
% расхождение между экспериментальной и расчетной
% кривыми в процентах от установившегося значения
delta = abs(h-y)/Y_st*100;
[delta_max, i] = max( delta ); % максимальное расхождение
кривых
figure(1);
hold on;
% расчетная переходная функция сушильного шкафа
plot( t, h, 'r', 'LineWidth', 2 );
plot( t(i), y(i), 'ro', t(i), h(i), 'ro');
line([t(i) t(i)], [y(i) h(i)], 'Color', 'r', 'LineWidth', 2, 'LineStyle', ':');
text(mean(t), min([y(i) h(i)]), strcat('\delta}_m_a_x =
      ', num2str(round(delta_max)), '%'), ...
      'FontWeight', 'bold', 'BackgroundColor', 'white');
```

2.10. После ввода команд для выполнения программы нажать клавишу F5. В результате на графике отобразится дополнительно кривая расчетной переходной функции выбранного звена, а также значение максимального расхождения между расчетной и экспериментальной кривыми, которое необходимо записать в отчет.

### III. Определение передаточной функции сушильного шкафа путем компьютерных расчетов в Simulink

3.1. Для решения задач идентификации динамических объектов в программе MATLAB-Simulink предназначен специальный раздел – System Identification (Идентификация систем). Для запуска раздела System Identification необходимо в MATLAB в окне ввода команд Command Window в командной строке (справа от знака >>) набрать слово ident и нажать ввод. В результате на экране появится

окно графического интерфейса раздела System Identification, вид которого показан на рис. 23.

3.2. Указать исходные данные для выполнения идентификации. Для этого в левом верхнем углу окна в раскрывающемся списке Data (Данные) выбрать вариант Import. Это приведет к открытию диалогового окна, показанного на рис. 24. Ввести в нем имя u в поле Input (Вход), y – в поле Output (Выход), в поле Starting time (Начальный момент времени) ввести 0, а в поле Samp. interv. (Интервал дискретизации) ввести выбранное при проведении эксперимента значение интервала опроса (5 с), в строке Data Name (Имя данных) указать произвольное название (например, Шкаф суш.).

3.3. Нажать кнопку Import. Далее нажатием кнопки Close (Закреть) закрыть окно импорта данных.

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

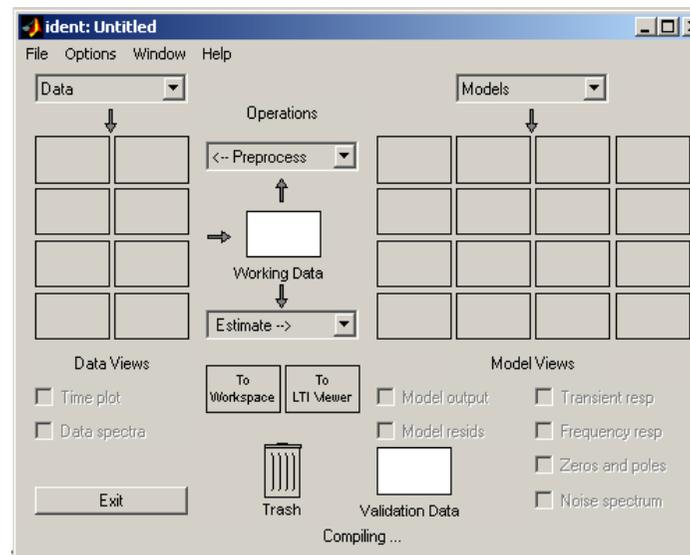


Рис. 23. Вид окна графического интерфейса раздела System Identification

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

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

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

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

$e(t)$  – дискретный белый шум.

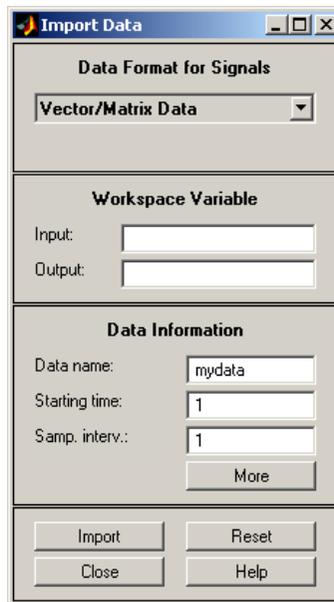


Рис. 24. Диалоговое окно импорта данных

3.6. В окне `ident: Untitled` интерфейса идентификации в раскрывающемся списке `Estimate` (Оценивание) выбрать вариант `Parametric models...` (т. к. оцениваются значения параметров передаточной функции объекта), что приведет к появлению диалогового окна, показанного на рис. 25.

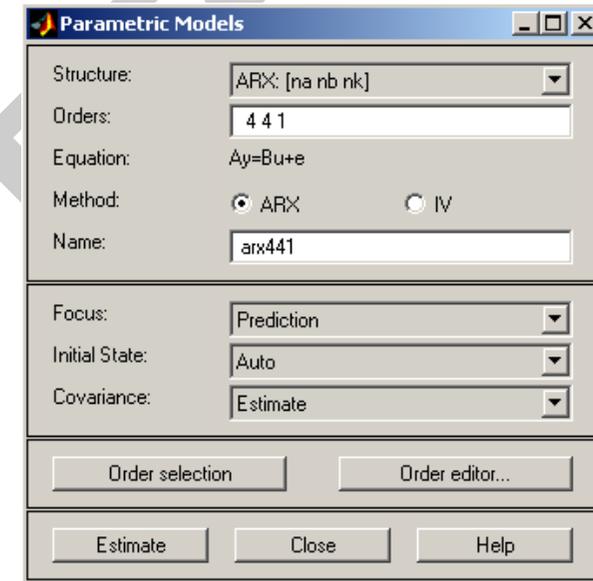


Рис. 25. Диалоговое окно задания параметрической модели

В данном окне во всплывающем списке `Structure` выбрать пункт `ОЕ:[nb nf nk]`, соответствующий модели «вход-выход».

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

3.8. Для задания значений, соответствующих апериодическому звену 1-го порядка:  $nf = 1$ ,  $nb = 1$  и  $nk = 1$ , нажать кнопку `Order Editor` (Редактор порядка модели) и в появившемся диалоговом окне во всплывающих списках `Poles` (Число полюсов передаточной функции), `Zeros + 1` (Число нулей передаточной функции + 1) и `Delay` (Запаздывание, выраженное числом интервалов дискретизации) выбрать, соответственно, значения  $nf = 1$ ,  $nb = 1$  и  $nk = 1$ ,

после чего нажать кнопку **Close** (Заккрыть). В результате в диалоговом окне **Parametric models...** в поле **Orders** (Порядок модели) появятся три единицы, а в поле **Name** (Имя модели) – заданное автоматически имя **oe111**. Для оценки передаточной функции объекта необходимо нажать кнопку **Estimate** (Оценить).

3.9. В результате в основном окне интерфейса **ident: Untitled** в его правой части **Model Views** (Вид моделей) появится значок с надписью **oe111**, означающий, что выбранная модель построена. Установить флажок **Model Output** (Выход модели) и в появившемся окне будут получены две кривые: экспериментальная и рассчитанная теоретически для выбранной модели. В правой части окна показывается степень совпадения (**Best fits**) рассчитанной кривой графика с экспериментальной. Значение 100 % соответствует точному совпадению.

3.10. Задать теперь в качестве модели аperiodическое звено 2-го порядка. Для этого в диалоговом окне **Parametric models...** нажать кнопку **Order Editor** и в появившемся диалоговом окне во всплывающем списке **Poles** задать значение  $nf = 2$ , ячейки **Zeros + 1** и **Delay** оставить без изменения:  $nb = 1$ ,  $nk = 1$ ; после чего нажать кнопку **Close** (Заккрыть). В результате в диалоговом окне **Parametric models...** в поле **Orders** появятся значения 1, 2, 3, а в поле **Name** – заданное автоматически имя модели **oe121**. Далее следует оценить новую передаточную функцию объекта, нажав кнопку **Estimate** (Оценить).

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

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

3.13. Преобразовать полученную модель **oe121** в передаточную функцию. Для этого скопировать построенную модель **oe121** из окна интерфейса идентификации в рабочее пространство переменных MATLAB: в окне интерфейса **ident: Untitled** в правой части **Model Views** нажать на значке модели **oe121** левой клавишей мыши и перетащить его на значок **To Workspace** (В рабочее

пространство), расположенный в этом же окне по центру. В результате в основном окне MATLAB на вкладке **Workspace** (Рабочее пространство) появится соответствующая строка с указанием имени переменной модели (**oe121**), ее размера и типа – **idpoly object** (объект модели).

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

3.14. Поэтому сначала необходимо выполнить обратное преобразование: дискретной модели – в непрерывную с помощью функции MATLAB **d2c()**, (**digital-to-continuous**). В командной строке MATLAB ввести следующую команду:

```
continuous_oe121 = d2c(oe121)
```

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

```
Continuous-time IDPOLY model: y(t) = [B(s)/F(s)]u(t) + e(t)
B(s) = 1.367e-005 s + 9.172e-006
F(s) = s^2 + 0.01272 s + 2.599e-005
Estimated using PEM from data set Шкаф суш.
Loss function 0.192328 and FPE 0.193385
```

3.16. Далее необходимо преобразовать непрерывную модель в передаточную функцию. Для этого в окне команд **Command Window** основного окна MATLAB в командной строке (справа от знака **>>**) ввести команду

```
trfunc_oe121 = tf(continuous_oe121, 'measured')
```

3.18. Функция MATLAB **tf()** преобразует объект модели (типа **idpoly object**) в передаточную функцию (в объект типа **tf – transfer function**). В результате будет получено выражение для передаточной функции исследуемого объекта, которую следует записать в отчет.

3.19. Построить на графике расчетную кривую переходной функции, соответствующую данной передаточной функции. Для этого в окне команд **Command Window** в командной строке ввести следующие команды:

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

3.20. Для найденной передаточной функции определить, чему равны значения постоянных времени  $T_3$ ,  $T_4$  апериодического звена 2-го порядка. Для этого сначала определить корни знаменателя передаточной функции. В командной строке MATLAB ввести следующие команды:

```
denominator = trfunc_oe121.den{1} % знаменатель  
r = roots(denominator) % корни знаменателя  
T3 = -1/r(2)  
T4 = -1/r(1)
```

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

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. График экспериментальной переходной функции сушильного шкафа.
3. Расчетные передаточная и переходная функции сушильного шкафа с указанием типа звена.
4. График расчетной переходной функции сушильного шкафа с указанием максимального расхождения между расчетной и экспериментальной кривыми.
5. Передаточная функция сушильного шкафа, полученная в результате компьютерной идентификации, и значения постоянных времени звена.
6. График расчетной переходной функции сушильного шкафа, полученной в результате компьютерной идентификации.

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

### Контрольные вопросы

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

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ (П-ЗАКОНОМ) РЕГУЛИРОВАНИЯ

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

### Задание:

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

### Аппаратура, используемая в лабораторной работе

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

### Порядок выполнения работы

#### I. Построение компьютерной модели САР с П-законом регулирования

В лабораторной работе исследуется замкнутая система автоматического регулирования, структурная схема которой приведена на рис. 26.

Передаточные функции объекта управления имеют вид передаточной функции апериодического звена 2-го порядка, как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям, что соответствует, например, математическому описанию сушильного шкафа, изображенного на рис. 22. Данная структурная схема, таким образом, представляет собой структурную схему линейной непрерывной системы автоматического регулирования температуры в сушильном шкафу.

Передаточная функция датчика соответствует передаточной функции апериодического звена 1-го порядка, что характерно для

датчиков температуры. Например, значения параметров передаточной функции  $K_d = 3,9 \text{ Ом}^\circ\text{C}$ ,  $T_d \approx 20 \text{ с}$  соответствуют термометру сопротивления Pt1000. Датчиком в данном случае может выступать переменное сопротивление, включаемое вместе с термосопротивлением датчика в резистивную измерительную мостовую схему (рис. 21), на выходе которой вырабатывается сигнал (электрическое напряжение) ошибки  $e(t)$ .

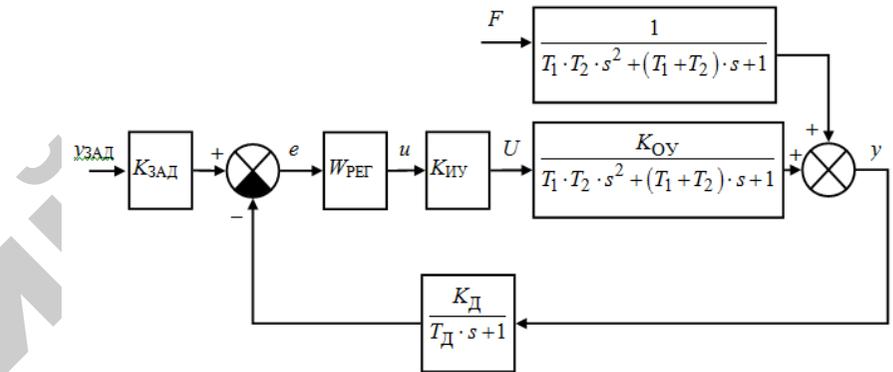


Рис. 26. Структурная схема моделируемой САР:  $y$  – управляемая величина;  $у_{зад}$  – заданное значение управляемой величины;  $e$  – ошибка управления;  $u$  – сигнал управления;  $U$  – управляющее воздействие на объект со стороны исполнительного устройства;  $F$  – возмущающее воздействие на объект

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

Числовые значения параметров передаточных функций элементов САР ( $K_{оу}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $K_d = K_{зад}$ ,  $T_d$ ,  $K_{иу}$ ) задаются преподавателем. Передаточная функция регулятора  $W_{рег}$  выбирается в соответствии с рассматриваемым типовым линейным законом регулирования (в данном случае, П-законом). Получаем:  $W_{рег} = K_p$ .

Для схемы САР, изображенной на рис. 26, выражения для  $W_0(s)$ ,  $W_{oc}(s)$ ,  $W_F(s)$  равны

$$W_0(s) = W_{\text{рег}}(s) \cdot K_{\text{ив}} \cdot \frac{K_{\text{оу}}}{T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1};$$

$$W_{\text{ос}}(s) = \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{д}} \cdot s + 1};$$

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

Передаточная функция ошибки регулирования САР по задающему воздействию (т. е. связь ошибки регулирования  $e$  с изменением задающего воздействия  $u_{\text{зад}}$ ) в этом случае (с учетом формулы (68)) имеет вид

$$W_{e_{\text{зад}}}(s) = \frac{1}{K_p \cdot K_{\text{ив}} \cdot \frac{K_{\text{оу}}}{T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1} \cdot \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{д}} \cdot s + 1} + 1} =$$

$$= \frac{(T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1) \cdot (T_{\text{д}} \cdot s + 1)}{(T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1) \cdot (T_{\text{д}} \cdot s + 1) + K_p \cdot K_{\text{ив}} \cdot K_{\text{оу}} \cdot K_{\text{д}}}.$$

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

$$W_{e_{\text{зад}}}(s) = \frac{1}{K_p \cdot K_{\text{ив}} \cdot \frac{K_{\text{оу}}}{T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1} \cdot \frac{K_{\text{д}}}{T_{\text{д}} \cdot s + 1} + 1} =$$

$$= \frac{T_{\text{д}} \cdot s + 1}{(T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1) \cdot (T_{\text{д}} \cdot s + 1) + K_p \cdot K_{\text{ив}} \cdot K_{\text{оу}} \cdot K_{\text{д}}}.$$

Выполнить запуск пакета компьютерного моделирования Simulink (так, как это показано при выполнении лабораторной работы № 2).

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

```
>> clear all; close all; clc;
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта
>> global K_sens T_sens % параметры датчика
>> global K_iv % параметры исполнительного устройства
>> global K_p % коэффициент усиления регулятора
>> T1 = ;
>> T2 = ;
>> K_obj = ;
>> K_sens = ;
>> T_sens = ;
>> K_p = ; % начальное значение
```

После знаков равенства нужно ввести заданные значения параметров.

Далее на основе структурной схемы САР на рис. 26 создать модель заданной САР в Simulink в окне редактирования модели. Для создания новой модели в меню окна Simulink Library Browser выполнить команду File → New → Model.

**1. Объект управления** (сушильный шкаф) математически представляет собой суммирующее звено, выполняющее функцию сложения двух сигналов: управляющего и возмущающего воздействий. В окне Simulink Library Browser в библиотеке Simulink на вкладке Math Operations найти компонент Sum, выделить его левой клавишей мыши и, не отпуская ее, перетащить данный компонент в окно редактирования модели untitled. Для задания имени компонента щелкнуть по нему один раз правой кнопкой мыши, во всплывающем меню выбрать пункт Format → Show Name; на появившейся снизу надписи Sum щелкнуть левой клавишей мыши, в строке редактирования надписи заменить надпись Sum на ОУ (объект управления); выйти из строки редактирования надписи щелчком левой клавиши мыши на свободном пространстве окна untitled. Для задания требуемого расположения входов (сверху и слева) выполнить двукратный щелчок левой клавишей мыши по самому

компоненту, в появившемся диалоговом окне **Block parameters** в строке **List of sings** вместо последовательности **|++** ввести последовательность **++|**, после чего нажать **Apply** и **OK**.

**2. Следующий элемент – передаточная функция объекта управления по управляющему воздействию**

$$W_{ou} = \frac{K_{об}}{T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1}.$$

В библиотеке **Simulink** на вкладке **Continuous** (Компоненты с непрерывными сигналами) левой клавишей мыши выделить компонент **Transfer Fcn** (Передаточная функция) и перетащить его в окно редактирования модели (расположив его слева от суммирующего компонента **OU**). Задать имя нового компонента: левой клавишей мыши щелкнуть на надписи **Transfer Fcn** под его изображением, войти в строку редактирования надписи и заменить ее на **W\_ou** (передаточная функция объекта по управляющему воздействию). После этого следует задать саму передаточную функцию, для чего выполнить двойной щелчок левой клавишей мыши на изображении компонента, и в окне редактирования его параметров **Block parameters**; в строке **Numerator**, определяющей коэффициенты в числителе передаточной функции, вместо имеющейся там единицы ввести коэффициент преобразования объекта **[ K\_obj ]**; в строке **Denominator** (знаменатель), определяющей коэффициенты полинома в знаменателе передаточной функции, ввести **[ (T1\*T2) (T1+T2) 1 ]**, после чего нажать **Apply** и **OK**. Соединить компонент **W\_ou** с суммирующим элементом **OU**, для чего подвести курсор мыши к компоненту **W\_ou** справа (к указателю выхода), затем, нажав левую клавишу мыши, соединить его с левым указателем входа компонента **OU**.

**3. Элемент – передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию**

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

Выбрать компонент **Transfer Fcn** (см. предыдущий пункт), расположить его в окне редактирования модели сверху от компонента

**W\_ou**. Задать имя компонента: **W\_of**. Задать передаточную функцию: в строке **Numerator** оставить предлагаемое по умолчанию значение коэффициента преобразования – **[1]**; в строке **Denominator** ввести **[ (T1\*T2) (T1+T2) 1 ]**, после чего нажать **Apply** и **OK**. Соединить компонент **W\_of** с суммирующим элементом **OU** (с верхним входом).

**4. Следующий элемент – исполнительное устройство.** Как видно из структурной схемы на рис. 26, исполнительное устройство является безынерционным звеном – его передаточная функция равна константе:  $W_{iu}(s) = K_{iu}$ . Поэтому следует выбрать компонент **Gain** (Линейное усиление), находящийся в библиотеке **Simulink** на вкладке **Math Operations**. Перетащить его в окно редактирования модели, расположив слева от **W\_ou**. Задать имя компонента: **Исп. уст-во**. Щелкнув два раза левой кнопкой мыши на самом компоненте, открыть окно редактирования его параметров **Block parameters** и в строке **Gain** ввести коэффициент усиления **K\_iu**. Соединить компонент **Исп. уст-во** с входом компонента **W\_ou**. На появившейся соединяющей линии-стрелке щелкнуть правой кнопкой мыши, во всплывающем меню выбрать пункт **Signal properties**, и в появившемся диалоговом окне в строке **Signal name** ввести обозначение сигнала на выходе исполнительного устройства **U** (управляющее воздействие на объект), после чего нажать **Apply** и **OK**. Обозначение **U** можно расположить сверху над стрелкой путем перетаскивания левой клавишей мыши.

**5. Регулятор (устройство управления).** Аналогично предыдущему пункту выбрать компонент **Gain** на вкладке **Math Operations** и расположить его в окне редактирования модели слева от исполнительного устройства. Задать имя компонента: **П-регулятор**. Ввести значение коэффициента усиления **K\_p**. Соединить компонент **П-регулятор** с входом исполнительного устройства. Ввести обозначение сигнала на выходе регулятора **u** (сигнал управления).

**6. Следующий элемент – устройство сравнения,** находящее разность сигналов задатчика и датчика и, таким образом, вырабатывающее сигнал ошибки **e**. В библиотеке **Simulink** на вкладке **Math Operations** выбрать компонент **Sum**, расположить его в окне редактирования модели слева от элемента **П-регулятор**. Щелкнув два раза на элементе левой кнопкой мыши, открыть диалоговое окно задания его параметров **Block parameters** и в строке **List of sings**

вместо последовательности |++ ввести последовательность |+ –, после чего нажать **Apply** и **OK**. При этом сигнал, подаваемый на нижний вход данного элемента, будет вычитаться из сигнала, подаваемого на вход слева. Выход сумматора соединить со входом элемента П-регулятор. Сигнал на выходе сумматора обозначить  $e$  (*error* – сигнал ошибки регулирования).

**7. Задатчик.** Компонент **Gain**, расположенный на вкладке **Math Operations**, перетащить в окно редактирования модели, поместив слева от сравнивающего устройства. Задать имя компонента: **Задатчик**. Ввести значение коэффициента преобразования  $K_{sens}$ . Соединить **Задатчик** с левым входом (плюсом) сравнивающего устройства. Ввести обозначение сигнала на выходе **Задатчика** –  $R_z$ .

**8. Датчик.** Для представления датчика используется компонент **Transfer Fcn** на вкладке **Continuous**. Расположив его в окне редактирования модели приблизительно под элементом исполнительного устройства, зеркально отразить его слева направо: для этого щелкнуть на самом компоненте правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выполнить команду **Format** → **Flip block**. Задать имя компонента: **Датчик**. Задать передаточную функцию: в строке **Numerator** ввести коэффициент  $[K_{sens}]$ ; в строке **Denominator** ввести  $[T_{sens} \ 1]$ , подтвердить ввод данных нажатием кнопок **Apply** и **OK**. Соединить выход датчика с нижним входом (минусом) сумматора, при этом линию связи обозначить как  $R_d$ . Ко входу датчика провести линию связи от выхода объекта управления **ОУ**.

Приблизительный вид созданной графической модели исследуемой САР температуры в сушильном шкафу показан на рис. 27.

Для сохранения построенной графической модели САР в виде файла выполнить команду меню окна редактирования модели **File** → **Save As** (можно также с помощью мыши нажать соответствующую кнопку  на панели инструментов). Сохранить модель в файле с названием «p\_regulator.mdl».

## II. Исследование показателей качества регулирования для САР с П-законом регулирования

Для проведения исследования зависимости показателей качества регулирования САР от значения коэффициента усиления П-регулятора

следует получить переходные функции САР при различных значениях  $K_p$  путем компьютерного моделирования.

Переходная функция САР – это график изменения управляемой величины системы при ступенчатом изменении задающего либо возмущающего воздействий. Соответственно, рассматривают обычно две переходных функции САР: переходную функцию системы по задающему воздействию и переходную функцию по возмущающему воздействию.

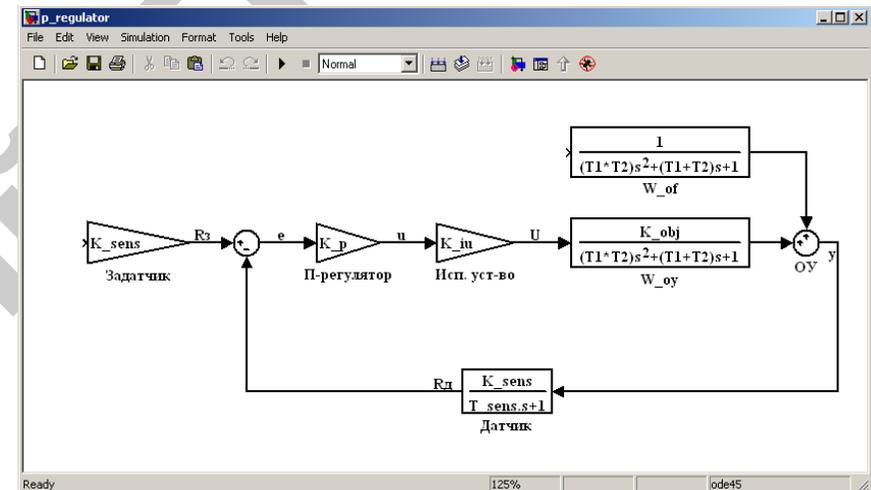


Рис. 27. Созданная графическая модель исследуемой САР с П-законом регулирования

Для моделирования подачи на вход системы (на задатчик) ступенчатого задающего воздействия используется находящийся в библиотеке **Simulink** на вкладке **Sources** (вкладка содержит компоненты, моделирующие различные источники сигналов) компонент **Step**. Разместить данный компонент в окне редактирования модели слева от задатчика и присвоить ему подпись **Задающее воздействие**. Соединить данный компонент со входом задатчика.

Для отображения в виде графика изменений сигналов задающего воздействия и управляемой величины используется находящийся на вкладке **Sinks** (Компоненты отображения и регистрации сигналов) компонент **Scope**. Расположить его в окне редактирования модели.

Первоначально компонент **Scope** имеет один вход, т. е. предназначен для отображения графика только одного сигнала. Для отображения двух сигналов необходимо задать число его входов равным 2. Для этого левой кнопкой мыши выполнить двойной щелчок на компоненте **Scope**, в результате откроется окно **Scope**, содержащее поле для отображения графика. В верхней части этого окна на панели инструментов выполнить левой кнопкой мыши

щелчок на кнопке **Parameters**  (второй слева), в появившемся всплывающем окне задания параметров в поле **Number of axes** ввести число 2, ввод данных подтвердить нажатием **Apply** и **OK**. После этого в окне редактирования модели (компонент **Scope** уже имеет 2 входа) верхний вход **Scope** соединить с выходом элемента **Step** (задающее воздействие), а нижний вход – с выходом сумматора **OU** (объект управления).

Перед началом процесса моделирования осталось задать **параметры моделирования**. Для этого в меню окна редактирования модели выполнить команду **Simulation** → **Simulation parameters**. В появившемся диалоговом окне задания параметров на вкладке **Solver** значение **Start time** (Начальный момент времени) оставить равным 0.0, значение **Stop time** (Конечный момент времени) заменить на 2000.0; на вкладке **Workspace I/O** убрать галочку в поле **Limit data points to last**; ввод данных подтвердить нажатием **Apply** и **OK**.

Запустить **процесс моделирования**, выполнив в меню окна редактирования модели команду **Simulation** → **Start**. По окончании процесса моделирования в строке состояния окна редактирования модели появится слово **Ready** (обозначающее готовность к новым вычислениям), а в окне **Scope** отобразятся графики изменения задающего воздействия (на верхнем поле) и управляемой величины (на нижнем поле). Для более детального рассмотрения графиков можно увеличить окно **Scope** до размеров всего экрана, а также нажать левой кнопкой мыши на панели инструментов кнопку

**Autoscale**  (Автоматическое масштабирование).

Для **анализа динамических характеристик линейных САУ** в Simulink имеется специальный компонент **LTI Viewer**. С его помощью можно быстро и легко рассчитывать временные (переходная

функция, импульсная переходная функция, перерегулирование, время регулирования, статическую ошибку регулирования) и частотные (АЧХ, ФЧХ, годограф Найквиста) характеристики моделируемой САУ.

Для получения с помощью компонента **LTI Viewer** переходную функцию исследуемой САУ по задающему воздействию сначала в окне редактирования модели следует отключить компонент **Step** от входа системы (удалить линию, соединяющую выход **Step** и вход задатчика). Далее в этом же окне выполнить команду меню **Tools** → **Linear analysis**. В результате этого на экране появятся два новых окна: **LTI Viewer** – окно, в котором будет отображаться график переходной функции, и **Model Inputs and Outputs** – окно, содержащее входную (**Input point**) и выходную (**Output point**) метки для указания входной и выходной точек системы. Обе эти метки необходимо с помощью мыши перетащить на свободное пространство в окно редактирования модели. После этого выход **Input point** следует соединить с входом задатчика, а вход **Output point** – с выходом объекта управления **OU**. Далее следует перейти в окно **LTI Viewer**, на самом окне щелкнуть правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выбрать пункт **Plot types** → **Step**. Для получения графика переходной функции САУ выполнить в этом же окне команду меню **Simulink** → **Get Linearizes Model**. В результате в окне **LTI Viewer** появится график переходной функции.

По полученному графику найти показатели качества регулирования САУ:

– для определения **перерегулирования** на свободном пространстве окна **LTI Viewer** с полученным графиком нажать правую клавишу мыши и во всплывающем меню выбрать пункт **Characteristics** → **Peak Response** (максимальная амплитуда). В результате на графике будет отмечена точка, соответствующая максимуму переходной функции. При наведении указателя мыши на данную точку появится всплывающая подсказка со следующей информацией: значение максимума (**Peak amplitude**), перерегулирование, выраженное в процентах (**Overshoot(%)**), значение соответствующего момента времени от начала моделирования (**At time (sec)**);

– для определения **времени регулирования** после щелчка правой клавишей мыши на свободной области графика во всплывающем

меню выбрать пункт Characteristics → Settling Time (Время регулирования);

– для определения **установившегося значения** выходной величины: после щелчка правой клавишей мыши на свободной области графика во всплывающем меню выбрать пункт Characteristics → Steady State (Установившееся значение).

Изменяя в указанном преподавателем интервале значение коэффициента усиления П-регулятора  $K_p$ , для каждого значения  $K_p$  следует получить переходную функцию САР и определить соответствующие значения  $\sigma$ ,  $t_{\text{РЕГ}}$  и  $e_{\text{СТ}}$ . Результаты отразить в табл. 6.

Таблица 6

Исследование показателей качества регулирования САР с П-законом регулирования

Величины	Значения						
$K_p$				...			
$\sigma, \%$				...			
$t_{\text{РЕГ}}, \text{с}$							
$e_{\text{СТ}}$							

### III. Исследование свойств САР с П-законом регулирования

По данным табл. 6 построить графики  $\sigma = \sigma(K_p)$ ,  $t_{\text{РЕГ}} = t_{\text{РЕГ}}(K_p)$ ,  $e_{\text{СТ}} = e_{\text{СТ}}(K_p)$  и определить зависимости показателей качества регулирования САР – перерегулирования  $\sigma$ , времени регулирования  $t_{\text{РЕГ}}$  и статической ошибки регулирования  $e_{\text{СТ}}$  – от значения коэффициента усиления П-регулятора. Сделать выводы о том, как изменяются значения показателей качества регулирования при изменении коэффициента усиления П-регулятора  $K_p$ .

#### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Компьютерная модель исследуемой САР, созданная в Simulink.
3. Результаты компьютерного моделирования (табл. 6).

4. Графики зависимостей перерегулирования  $\sigma$ , времени регулирования  $t_{\text{РЕГ}}$  и статической ошибки регулирования  $e_{\text{СТ}}$  от значения коэффициента усиления П-регулятора:  $\sigma = \sigma(K_p)$ ,  $t_{\text{РЕГ}} = t_{\text{РЕГ}}(K_p)$ ,

$$e_{\text{СТ}} = e_{\text{СТ}}(K_p).$$

5. Выводы о свойствах САР с П-законом регулирования.

#### Контрольные вопросы

1. Дать определение закона регулирования САР.
2. Дать определение пропорционального закона регулирования.
3. Что можно сказать о наличии статической ошибки регулирования при использовании П-регулятора?
4. Как изменяется значение статической ошибки регулирования САР при изменении значения  $K_p$  коэффициента усиления П-регулятора?
5. Как изменяется значение перерегулирования  $\sigma$  при изменении значения  $K_p$  коэффициента усиления П-регулятора?
6. Как изменяется время регулирования САР  $t_{\text{РЕГ}}$  при изменении значения  $K_p$  коэффициента усиления П-регулятора?

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.  
ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ  
ЗАКОНОМ (И-ЗАКОНОМ) РЕГУЛИРОВАНИЯ**

**Цель работы:** исследовать свойства САР с И-законом регулирования.

**Задание:**

1. Построить компьютерную модель замкнутой САР с И-законом регулирования, используя пакет компьютерного моделирования Simulink.

2. Исследовать зависимость показателей качества регулирования САР и интегрального критерия качества от значения коэффициента интегрирования И-регулятора.

3. Сделать выводы о свойствах САР с И-законом регулирования.

**Аппаратура, используемая в лабораторной работе**

Работа выполняется на персональных ЭВМ с использованием среды компьютерного моделирования MATLAB Simulink (см. лабораторную работу № 5).

**Порядок выполнения работы**

**I. Построение компьютерной модели САР с И-законом регулирования**

В лабораторной работе исследуется замкнутая система автоматического регулирования, структурная схема которой приведена на рис. 26. При этом передаточная функция регулятора  $W_{\text{рег}}$  выбирается в соответствии с рассматриваемым типовым линейным законом регулирования (в данном случае И-законом). Получаем  $W_{\text{рег}} = K_I \cdot 1/s$ . Числовые значения параметров передаточных функций элементов САР ( $K_{\text{ОУ}}, T_1, T_2, K_{\text{Д}} = K_{\text{АД}}, T_{\text{Д}}, K_{\text{ИУ}}$ ) задаются преподавателем.

Для рассматриваемой САР передаточная функция ошибки регулирования по задающему воздействию при И-законе регулирования (с учетом формулы (70)) имеет вид

$$W_{e_{\text{ЗАД}}}(s) = \frac{1}{\frac{K_I}{s} \cdot K_{\text{ИУ}} \cdot \frac{K_{\text{ОУ}}}{T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1} \cdot \frac{K_{\text{Д}}}{T_{\text{Д}} \cdot s + 1} + 1} =$$

$$= \frac{s \cdot (T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1) \cdot (T_{\text{Д}} \cdot s + 1)}{s \cdot (T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1) \cdot (T_{\text{Д}} \cdot s + 1) + K_I \cdot K_{\text{ИУ}} \cdot K_{\text{ОУ}} \cdot K_{\text{Д}}}$$

Передаточная функция ошибки регулирования САР по возмущающему воздействию (с учетом формулы (62)) равна

$$W_{e_{\text{F}}}(s) = \frac{1}{\frac{K_I}{s} \cdot K_{\text{ИУ}} \cdot \frac{K_{\text{ОУ}}}{T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1} \cdot \frac{K_{\text{Д}}}{T_{\text{Д}} \cdot s + 1} + 1} =$$

$$= \frac{s \cdot (T_{\text{Д}} \cdot s + 1)}{s \cdot (T_1 \cdot T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + 1) \cdot (T_{\text{Д}} \cdot s + 1) + K_I \cdot K_{\text{ИУ}} \cdot K_{\text{ОУ}} \cdot K_{\text{Д}}}$$

Тогда в статическом режиме после окончания процесса регулирования (т. е. при  $t \rightarrow \infty$  и, соответственно,  $s \rightarrow 0$ ) выражения для  $W_{e_{\text{ЗАД}}}(s)$  и  $W_{e_{\text{F}}}(s)$  становятся равными нулю:

$$W_{e_{\text{ЗАД}}}(s)_{s \rightarrow 0} = 0;$$

$$W_{e_{\text{F}}}(s)_{s \rightarrow 0} = 0.$$

Следовательно, ошибка регулирования в статическом режиме также будет равна нулю.

Выполнить запуск пакета компьютерного моделирования Simulink так, как это указано при описании выполнения лабораторной работы № 2. В окне ввода команд Command Window в строке ввода ввести следующие команды:

```

>> clear all; close all; clc;
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта
>> global K_sens T_sens % параметры датчика
>> global K_iu % параметры исполнительного устройства
>> global K_I % коэффициент интегрирования регулятора
>> T1= ;
>> T2 = ;
>> K_obj= ;
>> K_sens = ;
>> T_sens = ;
>> K_I = ; % начальное значение

```

После знаков равенства нужно ввести заданные значения параметров.

Далее на основе структурной схемы САП на рис. 26 создать в Simulink модель САП с И-законом регулирования. В качестве начальной основы можно взять изображенную на рис. 27 модель САП, созданную при выполнении предыдущей лабораторной работы № 5. В данную модель внести следующие **изменения**:

1. Удалить связь между выходом устройства сравнения и входом компонента П-регулятор.

2. Двойным щелчком левой кнопки мыши на компоненте П-регулятор открыть окно задания его параметров и в строке Gain вместо  $K_p$  ввести коэффициент интегрирования  $K_I$ . Результат ввода подтвердить нажатием клавиш Apply и OK.

3. Название компонента П-регулятор изменить на Коэффициент интегрирования.

4. Добавить в модель компонент Integrator, находящийся в библиотеке Simulink на вкладке Continuous. Значок интегратора поместить между значками устройства сравнения и коэффициента интегрирования. Выход устройства сравнения соединить со входом интегратора, а выход интегратора – со входом значка коэффициента интегрирования. Приблизительный вид модели с внесенными изменениями показан на рис. 28.

5. Для определения интегрального критерия качества  $J$  используется компонент Continuous RMS (CRMS), находящийся в библиотеке NCD Blockset на вкладке RMS Blocks. Данный компонент вычисляет среднее квадратическое значение непрерывного сигнала  $f(t)$ , поступающего на его вход:

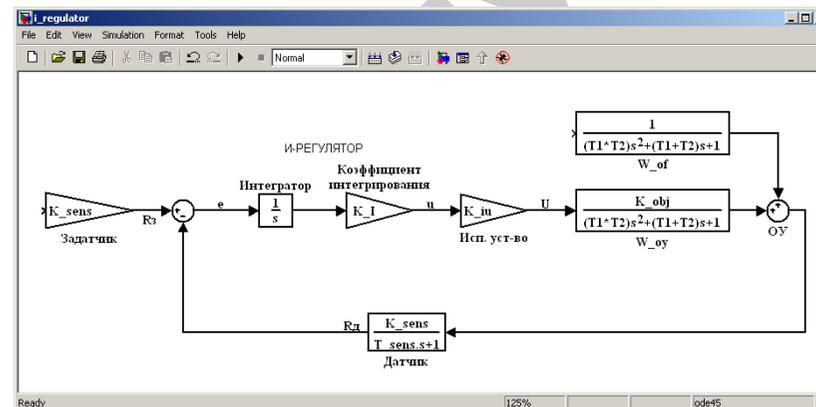


Рис. 28. Графическая модель исследуемой САП с И-законом регулирования

$$RMS(f(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t-T}^t f^2(\tau) \cdot d\tau},$$

где  $T$  – интервал времени, в течение которого выполняются регистрация сигнала  $f(t)$ , т. е., в нашем случае, интервал времени моделирования работы САП.

Вход компонента Continuous RMS подключить к выходу устройства сравнения. Таким образом, на вход компонента Continuous RMS будет подаваться сигнал ошибки регулирования  $e(t)$ . В итоге значение интегрального критерия качества регулирования автоматически рассчитывается по формуле

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T e^2(\tau) \cdot d\tau}. \quad (78)$$

Интервал времени  $T$  задается при указании параметров моделирования. Для этого нужно в окне редактирования модели выбрать пункт меню Simulation → Simulation parameters... и в появившемся окне задания параметров моделирования в ячейке Stop time указать момент времени окончания моделирования (момент времени начала моделирования в ячейке Start time оставить равным нулю). При указании момента окончания моделирования, достаточно большого для того, чтобы переходный процесс закончился, определяемый

по формуле (78) интегральный показатель качества регулирования  $J$  по своему физическому смыслу соответствует показателю  $J$ , определяемому по (65).

Для отображения рассчитанного числового значения показателя  $J$  используется компонент **Display**, находящийся в библиотеке **Simulink** на вкладке **Sinks**. Перетащить данный компонент в окно редактирования модели, вход компонента **Display** соединить с выходом компонента **Continuous RMS**.

Теперь при моделировании работы САР в поле компонента **Display** будет отображаться числовое значение интегрального показателя  $J$ .

6. Сохранить измененную модель в новом файле с названием «i\_regulator.mdl».

## II. Исследование показателей качества регулирования для САР с И-законом регулирования

В данной лабораторной работе необходимо исследовать зависимость показателей качества регулирования САР – перерегулирования  $\sigma$  и времени регулирования  $t_{\text{РЕГ}}$  – и интегрального критерия качества регулирования  $J$  от значения коэффициента интегрирования И-регулятора:  $\sigma = \sigma(K_I)$ ,  $t_{\text{РЕГ}} = t_{\text{РЕГ}}(K_I)$ ,  $J = J(K_I)$ .

Для этого необходимо, изменяя в указанном преподавателем интервале значение коэффициента интегрирования И-регулятора  $K_I$ , для каждого значения  $K_I$  получить переходную функцию САР и определить соответствующие значения  $J$ ,  $\sigma$  и  $t_{\text{РЕГ}}$ . Результаты отразить в табл. 7.

Последовательность действий при моделировании работы САР и методика использования компонента **LTI Viewer** для анализа работы САР аналогичны описанным в пункте II лабораторной работы № 5.

Исследование показателей качества регулирования САР с И-законом регулирования

Таблица 7

Величины	Значения					
$K_I$				...		
$J$						
$\sigma, \%$				...		
$t_{\text{РЕГ}}, \text{сек.}$						

## III. Исследование свойств САР с И-законом регулирования

По данным табл. 7 построить графики  $J = J(K_I)$ ,  $\sigma = \sigma(K_I)$ ,  $t_{\text{РЕГ}} = t_{\text{РЕГ}}(K_I)$  и определить зависимости интегрального критерия качества регулирования  $J$ , перерегулирования  $\sigma$  и времени регулирования  $t_{\text{РЕГ}}$  от значения коэффициента интегрирования И-регулятора  $K_I$ .

Сделать выводы о том, как изменяются значения показателей качества регулирования при изменении коэффициента интегрирования  $K_I$ .

Сравнить полученные минимальные значения перерегулирования  $\sigma$  и времени регулирования  $t_{\text{РЕГ}}$  для САР с И-законом регулирования с соответствующими минимальными значениями  $\sigma$  и  $t_{\text{РЕГ}}$  для САР с П-законом регулирования, исследованной в предыдущей лабораторной работе.

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Компьютерная модель исследуемой САР, созданная в Simulink.
3. Результаты компьютерного моделирования (табл. 7).
4. Графики зависимостей перерегулирования  $\sigma$ , времени регулирования  $t_{\text{РЕГ}}$  и интегрального критерия качества  $J$  от значения коэффициента интегрирования И-регулятора:  $\sigma = \sigma(K_I)$ ,  $t_{\text{РЕГ}} = t_{\text{РЕГ}}(K_I)$ ,  $J = J(K_I)$ .
5. Сравнение полученных минимальных значений перерегулирования  $\sigma$  и времени регулирования  $t_{\text{РЕГ}}$  для САР с И-законом регулирования с соответствующими минимальными значениями  $\sigma$  и  $t_{\text{РЕГ}}$  для САР с П-законом регулирования.
6. Выводы о свойствах САР с И-законом регулирования.

### Контрольные вопросы

1. Дать определение интегрального закона регулирования САР.
2. Привести формулу интегрального квадратичного критерия качества регулирования  $J$ .

3. Чему равна статическая ошибка регулирования при использовании И-регулятора?

4. Как изменяется значение интегрального критерия качества  $J$  при изменении значения  $K_I$  коэффициента усиления И-регулятора?

5. Как изменяется значение перерегулирования  $\sigma$  при изменении значения  $K_I$  коэффициента усиления И-регулятора?

6. Как изменяется время регулирования САР  $t_{\text{РЕГ}}$  при изменении значения  $K_I$  коэффициента усиления И-регулятора?

7. Как изменяются значения перерегулирования  $\sigma$  и времени регулирования  $t_{\text{РЕГ}}$  при использовании И-регулятора по сравнению с соответствующими показателями для П-регулятора?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

**Цель работы:** ознакомиться с методами синтеза САР.

**Задание:**

1. Построить компьютерную модель замкнутой САР с ПИД-регулятором в качестве устройства управления, используя пакет компьютерного моделирования Simulink.

2. Выполнить настройку ПИД-регулятора методом Зиглера-Никольса.

3. Выполнить настройку ПИД-регулятора с помощью реализованного в Simulink интерфейса компьютерной оптимизации и настройки САР NCD Output.

### Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Работа выполняется на персональных ЭВМ с использованием среды компьютерного моделирования MATLAB Simulink (см. лабораторную работу № 5).

### Порядок выполнения работы

#### I. Построение компьютерной модели САР с ПИД-законом регулирования

В лабораторной работе исследуется замкнутая система автоматического регулирования, структурная схема которой приведена на рис. 26. При этом передаточная функция регулятора  $W_{\text{РЕГ}}$  выбирается в соответствии с рассматриваемым типовым линейным законом регулирования (в данном случае, ПИД-законом). Числовые значения параметров передаточных функций элементов САР ( $K_{\text{ОУ}}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $K_{\text{Д}} = K_{\text{ЗАД}}$ ,  $T_{\text{Д}}$ ,  $K_{\text{ИУ}}$ ) задаются преподавателем.

Выполнить запуск пакета компьютерного моделирования Simulink так, как это указано при описании выполнения лабораторной работы № 2.

Для этого в окне ввода команд Command Window в строке ввода ввести следующие команды:

```

>> clear all; close all; clc;
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта
>> global K_sens T_sens % параметры датчика
>> global K_iu % параметры исполнительного устройства
>> global K_p K_I K_d % коэффициенты ПИД-регулятора
>> T1= ;
>> T2 = ;
>> K_obj= ;
>> K_sens = ;
>> T_sens = ;
>> K_iu = ;
>> K_p = 0;
>> K_I = 0;
>> K_d = 0;

```

После знаков равенства нужно ввести заданные значения параметров.

Далее на основе структурной схемы САУ на рис. 26 создать в Simulink модель САУ с ПИД-регулятором в качестве устройства управления. За начальную основу можно взять изображенную на рис. 27 модель САУ, созданную при выполнении лабораторной работы № 5. В данной модели необходимо П-регулятор заменить на ПИД-регулятор. Для этого нужно выполнить следующие шаги:

1. Удалить компонент П-регулятор.
2. В библиотеке блоков Simulink Extras на вкладке Additional Linear выбрать компонент PID Controller (ПИД-регулятор) и перетащить его в окно редактирования модели, расположить на месте удаленного значка между устройством сравнения и исполнительным устройством. Выход устройства сравнения соединить со входом ПИД-регулятора, а выход ПИД-регулятора – со входом исполнительного устройства.

4. Сохранить созданную модель в новый файл с именем «pid\_regulator.mdl». Примерный вид созданной графической модели показан на рис. 29.

## II. Настройка ПИД-регулятора методом Зиглера-Никольса

Начальные значения коэффициентов ПИД-регулятора должны быть равны нулю. Для этого необходимо в окне редактирования

модели выполнить двойной щелчок левой клавишей мыши на значке PID Controller. В результате откроется окно задания параметров ПИД-регулятора. В нем по умолчанию коэффициентам присвоены следующие значения:  $K_p = 1$  (поле Proportional),  $K_I = 1$  (поле Integral),  $K_d = 0$  (поле Derivative). Необходимо в полях Proportional и Integral ввести нулевые значения, после чего подтвердить ввод нажатием Apply и OK. Запустить процесс моделирования работы САУ, выбрав для этого команду меню Simulation → Start. В результате на экране осциллографа (для открытия экрана осциллографа сделать двойной щелчок левой клавишей мыши на значке Scope) можно убедиться, что изменение выходной величины равно нулю. Это естественно и объясняется тем, что выходной сигнал ПИД-регулятора, в соответствии с формулой (74), имеет нулевое значение.

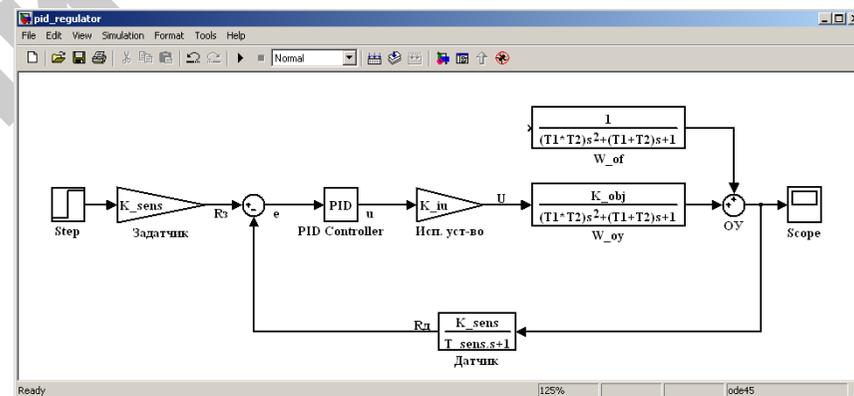


Рис. 29. Графическая модель САУ с ПИД-регулятором

Далее необходимо постепенно увеличивать значение параметра Proportional в ПИД-регуляторе, и для каждого нового значения выполнять моделирование работы и наблюдать на экране осциллографа за тем, какой вид имеет график переходной функции САУ.

Когда система окажется на границе устойчивости и переходная функция САУ будет иметь вид незатухающих колебаний (рис. 30), соответствующее значение параметра Proportional нужно запомнить. Для этого в окне ввода формул Command Window в строке ввода команд ввести следующие команды:

```
>> K_u =
>> T_u =
```

После знаков равенства нужно ввести значение параметра Proportional (для переменной  $K_u$ ) и определенный по графику период незатухающих колебаний переходной функции (для переменной  $T_u$ ).

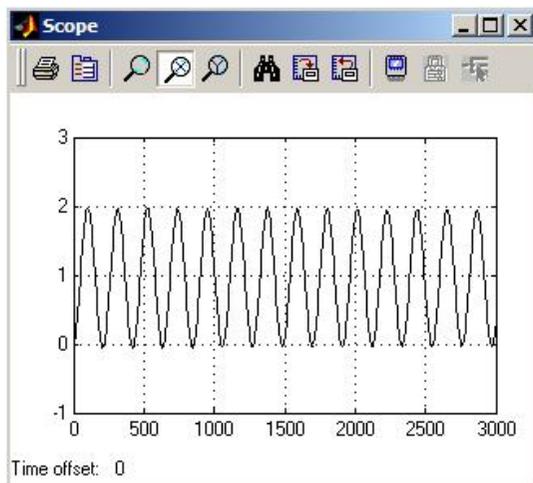


Рис. 30. Переходная функция САР в виде незатухающих колебаний

Затем в соответствии с формулой (75) в окне ввода формул Command Window в строке ввода команд ввести следующие команды:

```
>> K_p = 0.6*K_u ;
>> K_i = 2*K_u / T_u ;
>> K_d = K_u * T_u / 8 ;
```

Переменные  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  ввести в ПИД-регулятор в соответствующие поля: Proportional, Integral и Derivative.

Запустить моделирование работы САР, для получившейся переходной функции определить значения показателей качества: перерегулирования  $\sigma$  и времени регулирования  $t_{\text{РЕГ}}$ .

### III. Настройка ПИД-регулятора с помощью компонента NCD Output

Инструментальный пакет Nonlinear Control Design Blockset (NCD-Blockset) предоставляет в распоряжение пользователя графический интерфейс для настройки параметров Simulink-моделей динамических объектов, обеспечивающих желаемое качество переходных процессов.

В окне редактирования модели перетащить компонент NCD Output, который находится в библиотеке NCD Blockset. Вход компонента NCD Blockset соединить с выходом объекта управления ОУ. Двойным щелчком на пиктограмме NCD Output открыть рабочее окно данного блока. Рабочее окно блока NCD Output с временными ограничениями по умолчанию показано на рис. 31.

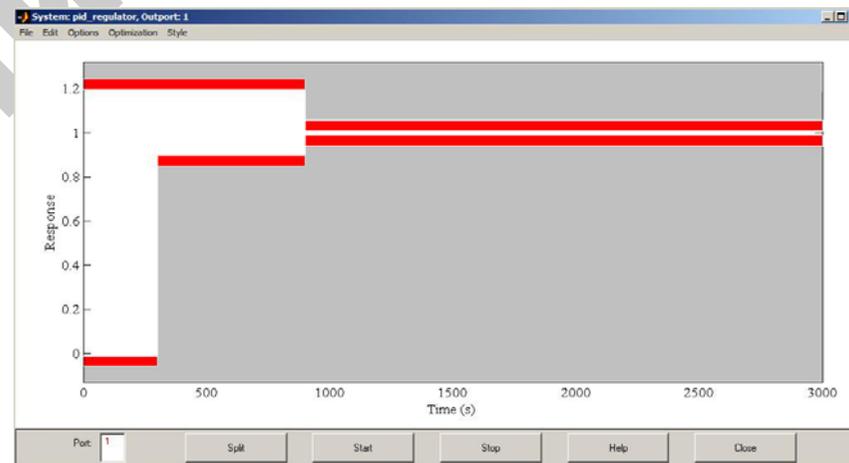


Рис. 31. Рабочее окно блока NCD Output

На рис. 31 изображено, что контролируемым сигналом является переходная характеристика, на которую накладываются следующие ограничения:

- максимальное перерегулирование – не более 20 %;
- время нарастания – не более 1000 с;
- длительность переходного процесса (время регулирования) – не более 3000 с.

Для установки других значений временных ограничений наиболее просто с помощью мыши переместить вертикальные и горизонтальные линии ограничений в требуемое положение. Точную установку линий ограничения можно провести, выбрав требуемые линии с помощью щелчка левой клавиши мыши (выбранная линия становится белой), и выполнив в меню **Edit** команду **Edit constraint** (изменить ограничение). В появляющемся окне редактора ограничений (**Constraint Editor**), в текстовом поле **Position editor**, необходимо задать начальную и конечную точки прямой в формате, нажав затем кнопку **Done**. Окно редактора ограничений можно открыть более просто: щелкнув на соответствующей линии правой клавишей мыши.

Установить положение левой верхней границы переходного процесса по вертикали с 1.2 на 1.3 (соответствует перерегулированию  $\sigma = 30\%$ ).

Далее необходимо указать настраиваемые параметры:  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_d$ . Выбор команды **Parameters** в меню **Optimization** приведет к открытию диалогового окна задания оптимизируемых параметров и интервала дискретизации – **Optimization Parameters** (рис. 32).

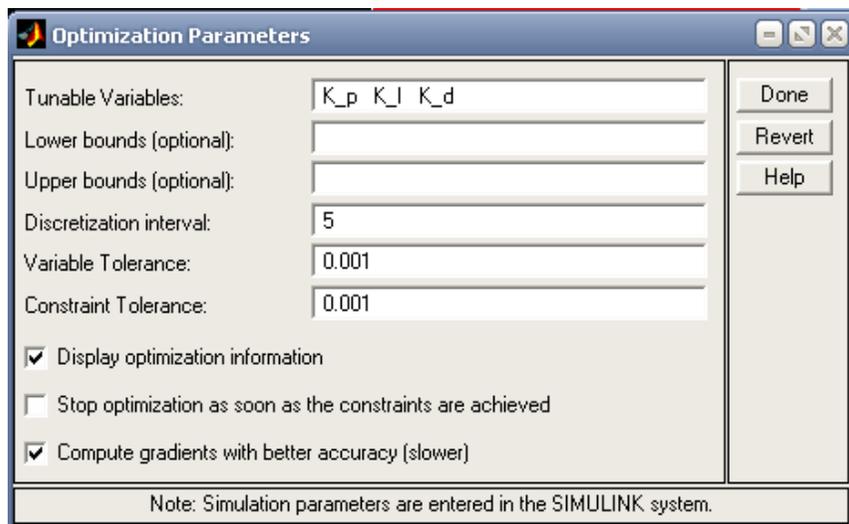


Рис. 32. Окно задания оптимизируемых параметров блока NCD Output

В текстовое поле **Tunable Variables** необходимо ввести имя оптимизируемой переменной. Если таких переменных несколько, в нашем случае три, то их имена разделяются пробелами.

В текстовое поле **Discretization Interval** вводится значение интервала дискретизации при моделировании переходного процесса, выраженное в секундах.

В качестве примера на рис. 32 показаны три оптимизируемых параметра ( $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_d$ ) и установлено значение интервала дискретизации, равное 5 с.

Для подтверждения ввода нажать кнопку **Done**.

Для запуска процесса оптимизации в меню рабочего окна блока **NCD Output** выбрать команду **Optimization** → **Start**.

После успешного окончания процесса оптимизации в окне ввода формул **Command Window** появится соответствующее сообщение: **Optimization Converged Successfully** (оптимизация выполнена успешно). В рабочем окне блока **NCD Output** будет отображен график переходного процесса, соответствующего оптимальным настройкам ПИД-регулятора. Оптимизированные значения коэффициентов  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_d$  можно просмотреть в окне ввода формул **Command Window**, введя в строке ввода формул следующее выражение:

```
>> K_p , K_I , K_d
```

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Компьютерная модель исследуемой САР с ПИД-регулятором в качестве устройства управления, созданная в Simulink.
3. Результаты настройки ПИД-регулятора по методу Зиглера-Никольса: значение коэффициента пропорциональной составляющей регулятора  $K_u$ , при котором в системе наблюдаются незатухающие колебания переходного процесса, значение периода незатухающих колебаний  $T_i$ ; значения коэффициентов  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_d$ , рассчитанные по формуле (75).
4. График переходной функции САР с оптимальными значениями параметров ПИД-регулятора, полученными по методу Зиглера-Никольса, по задающему воздействию.

5. Результаты настройки ПИД-регулятора с помощью блока NCD Output: значения коэффициентов  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_d$ .

6. График переходной функции САУ по задающему воздействию в рабочем окне блока NCD Output вместе с начальными ограничениями на вид переходной функции.

7. График переходной функции САУ с оптимальными значениями параметров ПИД-регулятора, полученными с помощью блока NCD Output, по задающему воздействию.

8. Сравнение оптимальных значений параметров ПИД-регулятора, полученных различными методами.

### Контрольные вопросы

1. Дать определение и привести передаточную функцию пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования САУ.

2. В чем заключается задача синтеза САУ?

3. Привести формулы метода Зиглера-Никольса настройки ПИД-регулятора.

4. Описать порядок настройки ПИД-регулятора с помощью компонента NCD Output.

## МОДУЛЬ 2. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ

### Краткие теоретические сведения

#### Двухпозиционные регуляторы

**Позиционной** называют САУ, в которой управляющее воздействие на объект ступенчато изменяется в зависимости от уровня ошибки.

Соответственно, **позиционным** называют закон регулирования, когда управляющее воздействие на объект принимает ряд постоянных дискретных значений (изменяется ступенчато) в зависимости от ошибки системы.

**Двухпозиционными** называются регуляторы, выходной сигнал и которых (сигнал управления) имеет два фиксированных значения, и переход с одного на другое происходит скачком.

Позиционные регуляторы обязательно включают в себя так называемые элементы прерывного действия, а именно, релейные элементы. Статические характеристики, связывающие входной и выходной сигналы наиболее распространенных релейных элементов, приведены на рис. 33. Реле с характеристикой на рис. 33 а называют **идеальным**, с характеристикой на рис. 33 б – реле с **зоной неоднозначности** ( $\pm a$ ).

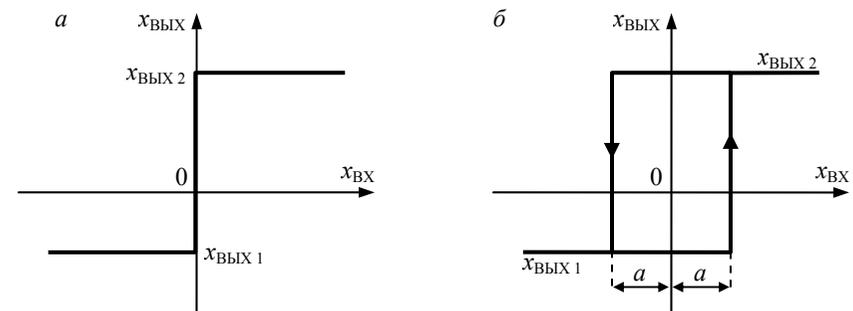


Рис. 33. Статические характеристики релейных элементов: идеального (а) и с зоной неоднозначности (б)

В двухпозиционных регуляторах под **входным сигналом**  $x_{\text{ВХ}}$  понимается отклонение регулируемой величины от заданного значения  $x_{\text{ЗАД}}$ , т. е. сигнал ошибки  $e$ , а под **выходным сигналом**  $x_{\text{ВЫХ}}$  — управляющий сигнал  $u$ .

Обычно двухпозиционные регуляторы работают следующим образом: полностью прекращают приток вещества или энергии к объекту регулирования при превышении регулируемой величины заданного уровня  $x_{\text{ЗАД}}$  и полностью восстанавливают этот приток при отклонении регулируемой величины от заданного уровня  $x_{\text{ЗАД}}$  в меньшую сторону. Сигнал управления  $x_{\text{ВЫХ}}$  имеет при этом лишь два значения:  $x_{\text{ВЫХ}1}$  и  $x_{\text{ВЫХ}2}$  (рис. 33). Одно из значений выходного сигнала двухпозиционного регулятора в этом случае соответствует отключенному состоянию реле, а второе — включенному.

**Примерами** позиционных САУ являются системы регулирования температуры в холодильнике, температуры подошвы утюга. Эти системы являются двухпозиционными, поскольку управляющее воздействие на объект принимает два значения. Например, при пониженной температуре подошвы утюга питание нагревательного элемента включается, при повышенной температуре — выключается.

В сельском хозяйстве позиционное регулирование применяется в системах регулирования микроклимата в животноводческих помещениях, регулирования температуры инкубаторов, температуры теплоносителя зерновых сушилок и т. д.

Рассмотрим работу двухпозиционной САУ на примере САУ температуры сушильной камеры с одним нагревательным элементом ЕК. Принципиальная схема двухпозиционной САУ изображена на рис. 34, ее структурная схема — на рис. 35.

При составлении структурной схемы нагреватель ЕК отнесен к объекту управления. Коэффициент передачи датчика перенесен в релейную характеристику регулирующего блока, поэтому сигнал ошибки  $e$  имеет размерность температуры.

Воздух в сушильной камере нагревается элементом ЕК. Температура воздуха  $\theta$  регулируется двухпозиционным регулятором А. При включении системы температура в камере меньше заданной  $\theta_0 < \theta_{\text{ЗАД}}$ , сигнал ошибки положителен и превышает половину зоны неоднозначности  $a$ :  $e = \theta_{\text{ЗАД}} - \theta_0 > a$ . Реле на выходе регулирующего блока А включается, и его замыкающий контакт А включает

магнитный пускатель КМ, который своими контактами запитывает нагревательный элемент ЕК. Начинается нагрев камеры. При повышении температуры до заданной  $\theta_{\text{ЗАД}}$  плюс половина зоны неоднозначности  $a$ , когда сигнал ошибки станет равен  $e = -a$ , реле на выходе регулирующего блока выключится, контакт А разомкнется, магнитный пускатель КМ выключится и обесточит нагревательный элемент ЕК. В результате температура в сушильной камере начнет снижаться. Реле снова включится, когда сигнал ошибки станет равен  $e = +a$ .

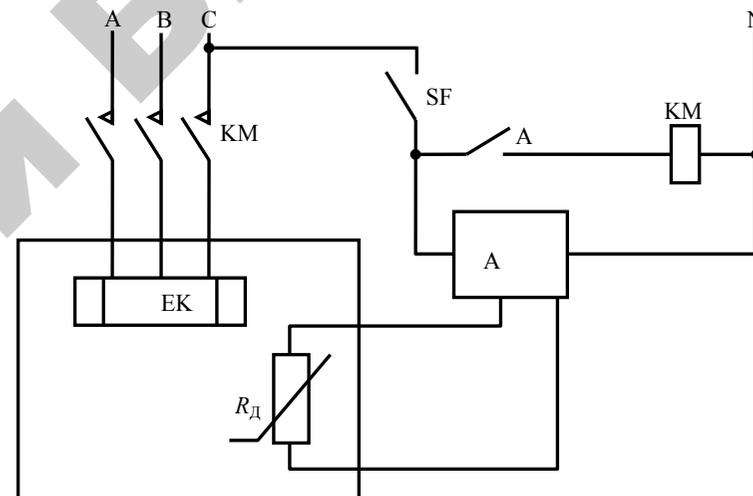


Рис. 34. Принципиальная схема двухпозиционной САУ температуры сушильной камеры: ЕК — нагревательный элемент; А — регулирующий блок,  $R_{\text{д}}$  — датчик (термометр сопротивления); А — контакт выходного реле регулирующего блока

Процесс нагрева и охлаждения воздуха в сушильной камере повторяется. Таким образом, в сушильной камере устанавливается режим периодического нагрева и охлаждения.

Такие установившиеся режимы работы называются **автоколебательными**. Процесс регулирования температуры в сушильной камере после включения САУ температуры изображен на рис. 36.

Размах автоколебаний больше ширины зоны неоднозначности  $2a$ , что обусловлено **инерционностью** датчика и объекта управления. В нашем примере за счет инерционности датчика изменение

сигнала ошибки  $e(t)$  отстает по времени от изменения температуры в камере  $\theta(t)$ , поэтому реле срабатывает позже. Кроме того, снижение (повышение) температуры начинается не сразу после срабатывания реле, а после того, как нагревательный элемент несколько охладится (нагреется).

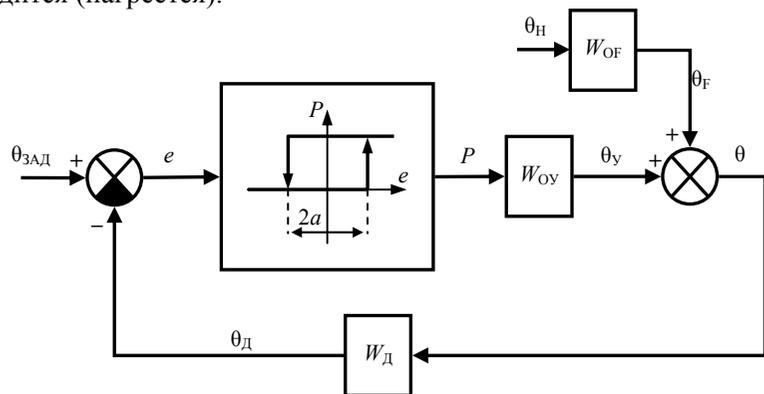


Рис. 35. Структурная схема двухпозиционной САР температуры сушильной камеры:  $\theta_{зад}$  – заданная температура;  $e$  – сигнал ошибки;  $P$  – мощность нагревателя;  $\theta_H$  – температура наружного воздуха (возмущающее воздействие);  $\theta_F$  – приращение температуры в камере за счет изменения наружной температуры;  $\theta_y$  – приращение температуры в камере от работы нагревателя;  $\theta$  – температура в камере;  $\theta_d$  – сигнал датчика;  $2a$  – ширина зоны неоднозначности регулятора;  $W_{OY}$  – передаточная функция сушильной камеры по управляющему воздействию;  $W_{OF}$  – передаточная функция сушильной камеры по возмущающему воздействию;  $W_D$  – передаточная функция датчика

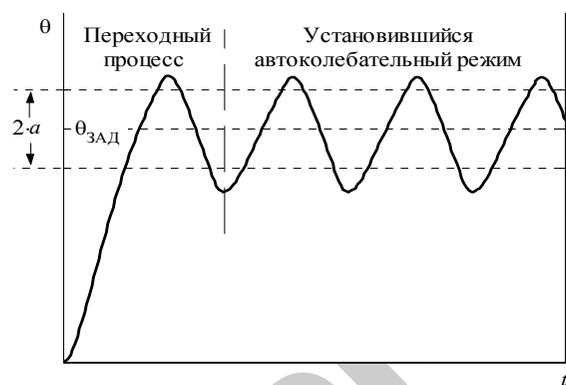


Рис. 36. Процесс регулирования температуры в сушильной камере, обеспечиваемый двухпозиционной САР

При увеличении задающего воздействия (в нашем случае температуры  $\theta_{зад}$ ) автоколебания несколько смещаются вверх, при снижении – вниз. При увеличении возмущающего воздействия (в нашем случае температуры наружного воздуха  $\theta_H$ ) изменяется период и форма автоколебаний, а также скважность импульсов включения/отключения регулятора.

**Показателями качества регулирования** для двухпозиционных САР являются *отклонение регулируемой величины от заданного значения* (в нашем примере от заданной температуры  $\theta_{зад}$ ) и *частота автоколебаний*. **Быстродействие** системы определяется временем установления автоколебаний.

**Параметрами настройки регулятора** являются заданное значение регулируемой величины (в нашем примере  $\theta_{зад}$ ) и ширина зоны неоднозначности  $2a$ .

Для исследования режимов работы позиционных САУ в настоящее время наиболее точным, удобным и наименее трудоемким методом является компьютерное моделирование, в процессе которого и определяются значения параметров настройки регулятора.

### Трехпозиционные регуляторы

**Трехпозиционными** называются регуляторы, выходной сигнал  $u$  которых (сигнал управления) имеет три фиксированных значения, и переход от одного к другому значению происходит скачком (рис. 37). Принципиальная схема трехпозиционной САР изображена на рис. 38, ее структурная схема изображена на рис. 39.

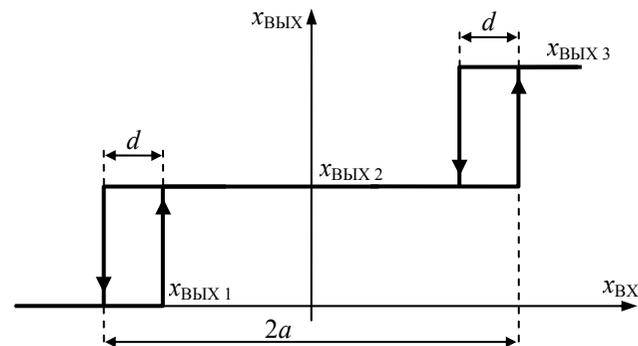


Рис. 37. Статическая характеристика трехпозиционного регулятора

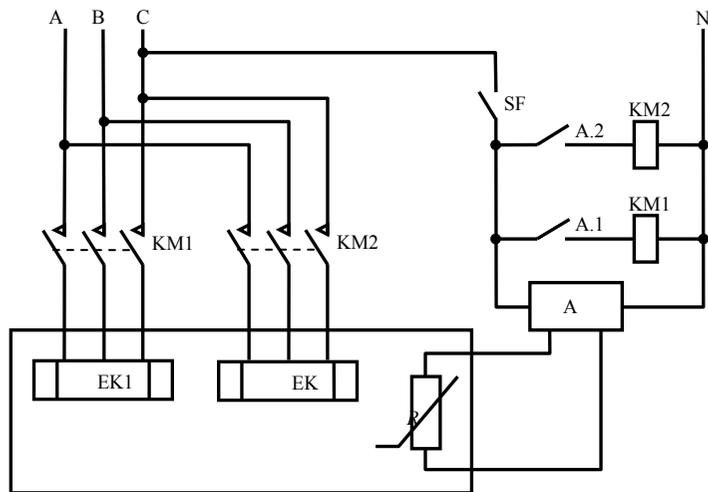


Рис. 38. Принципиальная схема трехпозиционной САР температуры сушильной камеры:  
 EK1, EK2 – нагревательные элементы;  $R_d$  – датчик (термометр сопротивления);  
 А – регулирующий блок; А.1, А.2 – контакты выходных реле регулирующего блока

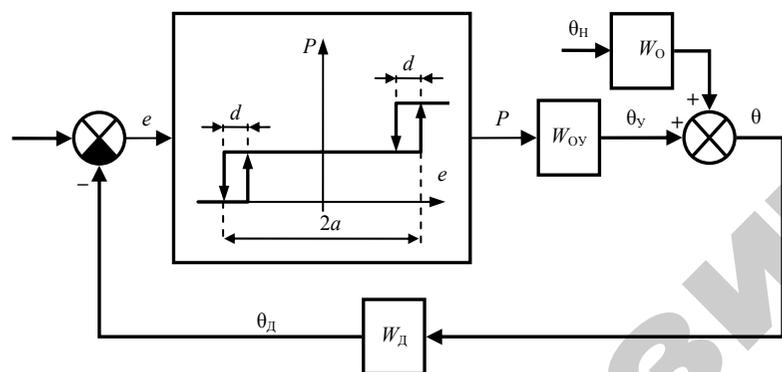


Рис. 39. Структурная схема трехпозиционной САР температуры сушильной камеры:  
 $\theta_{зад}$  – заданная температура;  $e$  – сигнал ошибки;  $P$  – мощность нагревателя;  
 $\theta_d$  – сигнал датчика;  $\theta_n$  – температура наружного воздуха;  $\theta_F$  – приращение температуры в камере за счет изменения наружной температуры;  $\theta_y$  – приращение температуры в камере от работы нагревателя;  $\theta$  – температура в камере;  $2a$  – ширина зоны нечувствительности;  $d$  – зоны неоднозначности (дифференциалы);  
 $W_{oy}$  – передаточная функция сушильной камеры по управляющему воздействию;  
 $W_{of}$  – передаточная функция сушильной камеры по возмущающему воздействию;  
 $W_d$  – передаточная функция датчика

После включения системы срабатывают оба реле регулирующего блока А, поэтому пускатели КМ1 и КМ2 запитывают оба нагревателя ЕК1 и ЕК2. Температура в сушильной камере быстро растет.

Когда температура входит в зону нечувствительности  $2a$  плюс дифференциал  $d$ , т. е. когда  $\theta(t) \geq \theta_{зад} - (a - d)$ , ошибка регулирования становится меньше  $e \leq a - d$ , и первое реле отключается, пускатель КМ1 обесточивает нагревательный элемент ЕК1. Далее возможны три варианта работы системы:

1. Если мощности второго нагревательного элемента ЕК2 *не хватает для дальнейшего повышения температуры или удержания его в зоне нечувствительности* (что может быть при достаточно низкой наружной температуре), температура в камере начинает снижаться. После выхода из зоны нечувствительности нагревательный элемент ЕК1 опять включится и температура начнет подниматься. В результате возникают автоколебания около нижней зоны неоднозначности  $d$  (рис. 40, график 1).

2. Если мощности второго нагревательного элемента ЕК2 *хватает для удержания температуры в зоне нечувствительности*, то в системе устанавливается статический режим (рис. 40, график 2).

3. Если мощности второго нагревателя ЕК2 *хватает для дальнейшего повышения температуры*, то после выхода температуры из зоны нечувствительности, т. е. при  $\theta(t) \geq \theta_{зад} + a$ , срабатывает второе реле, размыкается контакт А.2 и пускатель КМ2 обесточивает нагревательный элемент ЕК2. Температура начинает понижаться. После входа температуры в зону нечувствительности, т. е. при  $\theta(t) \leq \theta_{зад} + a - d$ , когда ошибка становится  $e \leq a - d$ , второе реле выключается, контакт А.2 замыкается, пускатель запитывает нагревательный элемент ЕК2, температура начинает повышаться. Возникает режим автоколебаний около верхней зоны неоднозначности  $d$  (рис. 40, график 3).

В работающей системе переход из одного режима в другой происходит при изменении возмущающего воздействия (в нашем примере – при изменении температуры наружного воздуха). При повышении  $\theta_n$  автоколебания смещаются вверх, при понижении – вниз.

Если система неправильно разработана или настроена, например, при установке слишком узкой зоны нечувствительности,

в трехпозиционной системе могут возникать трехпозиционные автоколебания (рис. 41). При этом режим работы сходен с режимом работы двухпозиционной системы. Как правило, такая работа трехпозиционной системы неприемлема.

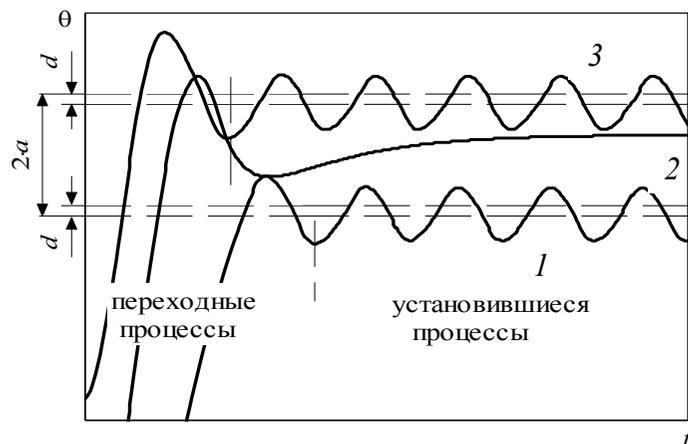


Рис. 40. Процесс регулирования температуры в сушильной камере, обеспечиваемый трехпозиционной системой: 1 – режим автоколебаний около нижней зоны неоднозначности  $d$ ; 2 – статический установившийся режим; 3 – режим автоколебаний около верхней зоны неоднозначности  $d$

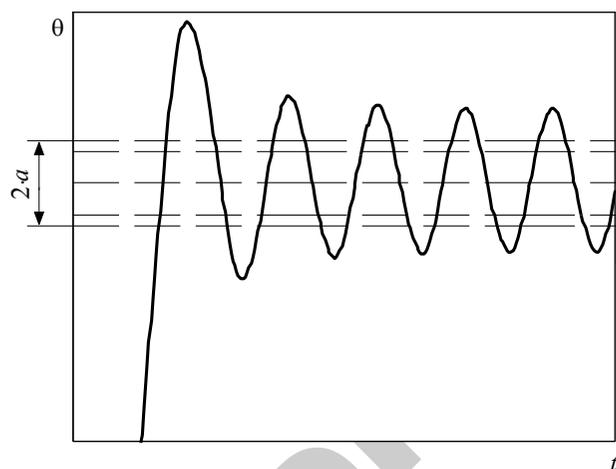


Рис. 41. Режим трехпозиционных автоколебаний в трехпозиционной системе

**Параметрами настройки** регулятора трехпозиционной системы являются **заданное значение** регулируемой величины (в нашем случае  $\theta_{зад}$ ) и **ширина зоны нечувствительности**  $2a$ . В некоторых регуляторах можно также изменять **дифференциал**  $d$ .

**Параметрами качества регулирования** являются **отклонения** регулируемой величины от заданного значения, **частота** и **амплитуда** автоколебаний. **Быстродействие** системы определяется временем перехода системы в установившийся режим работы.

### Потенциметрические регуляторы

Потенциметрические измерительные преобразователи предназначены для преобразования линейных или угловых перемещений в напряжения постоянного или переменного тока.

При автоматизации различных технологических процессов потенциметрический измерительный преобразователь выполняет функции преобразования механического перемещения в пропорциональный электрический сигнал. Простота преобразования различных физических величин в перемещение позволяет использовать потенциметрические измерительные преобразователи в приборах для измерения уровня расхода, давления, силы, веса и т. п., а также в системах для непосредственной передачи угла поворота, в следящих системах, регуляторах, устройствах обработки данных, цифровых индикаторах [4].

В системах автоматики наибольшее распространение получили проволочные потенциметрические измерительные преобразователи.

В качестве материала для каркасов используются пластмассы, текстолит, гетинакс, керамика и другие изоляционные материалы. Применяются также алюминиевые каркасы с изоляционной оксидной пленкой. Алюминиевый каркас обладает высокой теплопроводностью и позволяет увеличивать плотность тока в обмотке, а следовательно, повысить чувствительность датчика.

Для точных потенциметрических преобразователей в качестве материала обмотки применяются сплавы на основе благородных материалов. К ним относятся: платиноиридиевые, платиномедные, золотоникелевые и палладийсеребряные. Диаметр проволоки для точных датчиков выбирается в пределах от 0,03 до 0,1 мм.

Для грубых потенциметрических преобразователей обмотка изготавливается из сплавов неблагородных металлов (константан, манганин, нихром). Диаметр проволоки 0,1–0,3 мм.

Щетки движков точных преобразователей выполняются в виде нескольких проволоочек. В более грубых роль подвижного контакта выполняют пластинчатые пружины.

Входным сигналом потенциметрического преобразователя рис. 42, а является перемещение контактной щетки. Выходным сигналом является напряжение, снимаемое со щеток потенциметра.

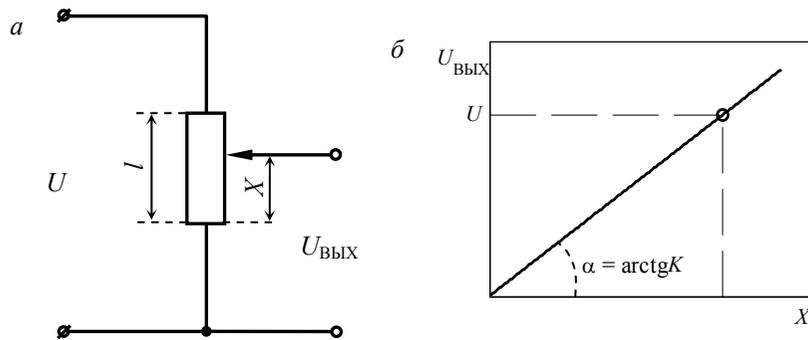


Рис. 42. Потенциметрический датчик:  
а – схема включения; б – статическая характеристика

К зажимам обмотки реостата подключается напряжение  $U$  постоянного или переменного тока неизменного значения. При перемещении движка выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  меняется пропорционально входной величине  $X$ . Таким образом, осуществляется преобразование перемещения в напряжение (рис. 42, б). Учитывая, что по конструктивным особенностям  $R \propto l$ ,  $r \propto X$ , где  $R$  – полное сопротивление преобразователя;  $l$  – длина намотки обмотки;  $r$  – сопротивление части обмотки, приходящейся на перемещение  $X$  движка реостата, функция преобразования будет иметь вид:

$$U_{\text{вых}} = \left(\frac{U}{R}\right) \cdot r = \left(\frac{U}{l}\right) \cdot X = K \cdot X, \quad (79)$$

где  $K$  – коэффициент преобразования (чувствительность) в режиме холостого хода (х. х.).

Для преобразователя углового перемещения в режиме холостого хода функции преобразования равна:

$$U_{\text{вых}} = K \cdot \varphi, \quad (80)$$

где  $\varphi$  [рад] – угол поворота движка от нулевого положения.

Таким образом, статическая характеристика линейных потенциметров при отсутствии нагрузки представляет собой прямую, проходящую через начало координат под углом

$$\alpha = \arctg K. \quad (81)$$

Как следует из приведенной статической характеристики, рассмотренные преобразователи относятся к **однотактным** элементам, т. е. они не реагируют на знак входного сигнала. В ряде случаев необходимы преобразователи, учитывающие знак входного сигнала – **двухтактные** измерительные преобразователи. Их можно построить на основе однотактных потенциметрических преобразователей, если снимать выходной сигнал с движка и средней точки потенциметра или с диагонали мостовой схемы, образованной двумя потенциметрическими датчиками со средней точкой.

Два возможных варианта включения потенциметрических датчиков по двухтактной схеме приведены на рис. 43 а, б. Их статические характеристики соответственно 1 и 2 (рис. 43, в) имеют разную крутизну. Это объясняется тем, что при включении преобразователей по мостовой схеме (рис. 43, б) изменение входного сигнала обрабатывается двумя движками, смещающимися в разные стороны от средней точки, что приводит к появлению удвоенного выходного напряжения по сравнению со схемой, представленной на рис. 43, а.

Реальные характеристики реостатных преобразователей значительно отличаются от рассмотренных идеальных из-за различных погрешностей: дискретности выходного сопротивления; отклонения функции преобразования от расчетной, вызванного непостоянством диаметра намоточного провода и его удельного электрического сопротивления; изменения температуры преобразователя; влияния сопротивления нагрузки и других факторов.

При перемещении движка сопротивление включенной части потенциометра изменяется дискретно с шагом, равным сопротивлению одного витка:

$$\Delta R = R/w, \quad (82)$$

где  $R$  [Ом] – сопротивление реостата;  
 $w$  – число витков обмотки.

Соответственно изменяется и выходное напряжение. Это явление определяет два фактора: порог чувствительности и зону нечувствительности. Если их рассматривать относительно входного перемещения, то численно они будут равны диаметру провода обмотки типа «виток к витку» или шагу намотки  $l_{III}$  при расположении витков с зазором.

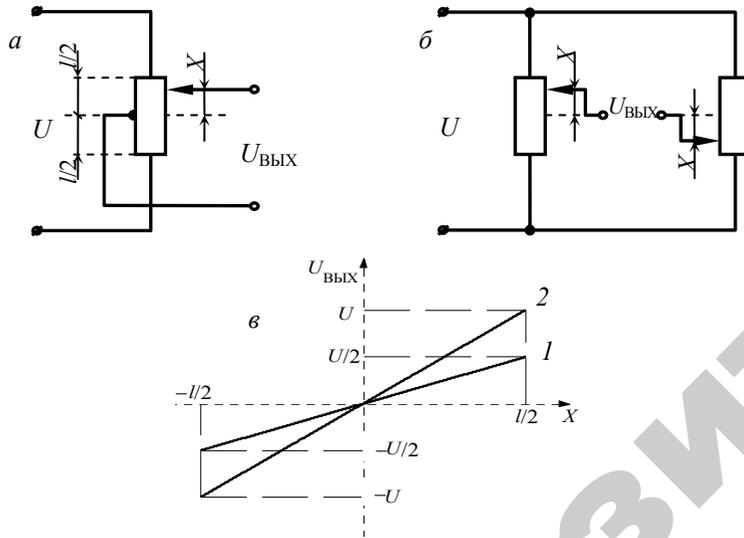


Рис. 43. Варианты включения потенциметрического датчика:  
 $a$  – с использованием средней точки;  $b$  – по мостовой схеме;  
 $c$  – статические характеристики 1 и 2, соответствующие схемам включения

Абсолютная погрешность дискретности или зона нечувствительности в зависимости от формы представления характеристики (как функции сопротивления, перемещения или напряжения) будет определяться выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta R &= \frac{R}{2w}; \\ \Delta X &= \frac{l}{2w}; \\ \Delta U &= \frac{U}{2w}. \end{aligned} \quad (83)$$

Соответственно выражения для относительных погрешностей примут вид:

$$\delta R = \delta X = \delta U = \frac{1}{2w}. \quad (84)$$

В реальных конструкциях линейных реостатных преобразователей число витков составляет около 2000 (минимально около 200), а погрешность дискретности соответственно равна 0,02–0,03%. Суммарная погрешность, вызванная непостоянством электрических параметров преобразователя, достигает 0,03–0,10%. Температурная погрешность, определяемая, прежде всего, изменением сопротивления намоточного провода с температурой, не превышает обычно 0,1% на 10 °С.

Наибольшую погрешность может обусловить неправильно выбранный режим работы преобразователя (например, малое сопротивление нагрузки). Реостатный преобразователь с подключенной нагрузкой  $R_H$  (рис. 44,  $a$ ) можно представить эквивалентной схемой (рис. 44,  $b$ ) ненагруженного преобразователя. Для нее справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}} &= I \cdot \frac{R_H \cdot r}{R_H + r}; \\ I &= \frac{U}{(R - r) + \frac{R_H \cdot r}{(R_H + r)}}. \end{aligned}$$

Подставляя второе выражение в первое, получаем

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U \cdot R_{\text{H}} \cdot r}{R \cdot R_{\text{H}} + R \cdot r - r^2}. \quad (85)$$

Как видно из полученного выражения, статическая характеристика  $U_{\text{ВЫХ}} = f(r)$  зависит от сопротивления нагрузки и определяет методическую погрешность. Существенное значение имеет соотношение  $R_{\text{H}}$  и  $R$ . Можно рассмотреть два случая:

- $R_{\text{H}}$  значительно больше  $R$ ;
- $R_{\text{H}}$  соизмеримо с  $R$  реостата.

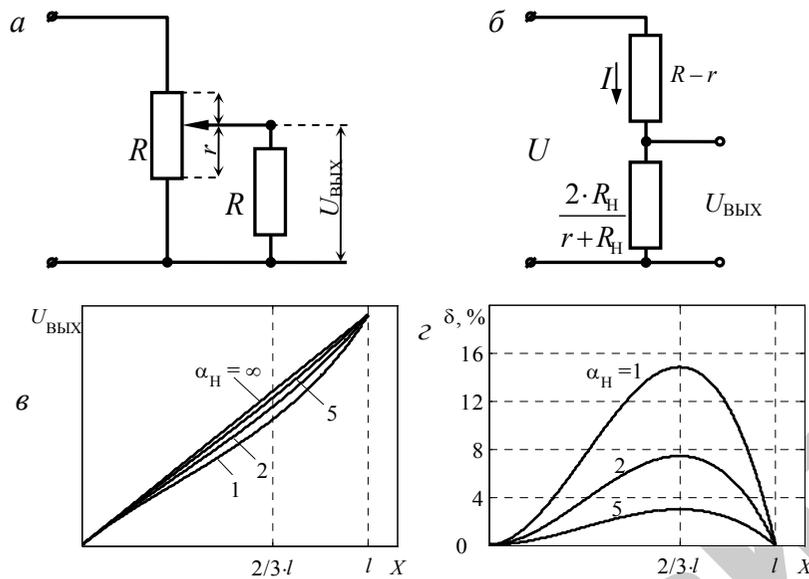


Рис. 44. Потенциметрический датчик:

а – схема включения с нагрузкой; б – эквивалентная схема; в – статические характеристики; г – графики погрешностей

Выражение (85) можно представить в виде

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U \cdot r}{R + \left(\frac{R}{R_{\text{H}}}\right) \cdot r - \frac{r^2}{R_{\text{H}}}}.$$

Для  $R_{\text{H}} \gg R$  величинами  $\left(\frac{R}{R_{\text{H}}}\right) \cdot r$ ,  $\frac{r^2}{R_{\text{H}}}$  можно пренебречь по сравнению с  $R$ . Тогда

$$U_{\text{ВЫХ}} = \left(\frac{U}{R}\right) \cdot r = U_{\text{ВЫХ}0}.$$

Аналогичный результат можно получить, приняв  $R_{\text{H}} \rightarrow \infty$ , и прийти к режиму холостого хода, т. е. отсутствию нагрузки на выходе преобразователя.

Для  $R_{\text{H}} = R$  абсолютная погрешность от несовпадения идеальной и реальной статических характеристик определится выражением

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_{\text{ВЫХ}0} - U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U \cdot r}{R} - \frac{U \cdot R_{\text{H}} \cdot r}{R \cdot R_{\text{H}} + R \cdot r - r^2} = \\ &= U \cdot \frac{r^2 \cdot (R - r)}{R^2 \cdot R_{\text{H}} + R^2 \cdot r - R \cdot r^2} \approx U \cdot \frac{r^2 \cdot (R - r)}{R^2 \cdot R_{\text{H}}}. \end{aligned}$$

Последнее выражение получено, исходя из предположения, что  $R^2 \cdot r - R \cdot r^2 \approx R^2 \cdot R_{\text{H}}$ . При малых значениях  $r$  (т. е. при  $r \ll R$ ) это предположение, очевидно, справедливо, а при увеличении  $r$  и приближении его значения к  $R$  разность  $R^2 \cdot r - R \cdot r^2 \rightarrow 0$ .

Относительная погрешность равна

$$\delta = \frac{\Delta U}{U} = \frac{r^2 \cdot (R - r)}{R^2 \cdot R_{\text{H}}}. \quad (86)$$

Чтобы определить максимальную погрешность, приравняем производную  $\frac{d\delta}{dr}$  к нулю:

$$\frac{d\delta}{dr} = \frac{2 \cdot r \cdot R - 3 \cdot r^2}{R^2 \cdot R_{\text{H}}} = 0,$$

что справедливо при условии  $2 \cdot r \cdot R - 3 \cdot r^2 = 0$ , откуда получаем

$$r = \frac{2}{3} R. \quad (87)$$

Следовательно, преобразователь имеет наибольшую погрешность при отклонении движка на  $2/3$  общей длины  $l$ . Подставив выражение (87) в (86), получим формулу для расчета максимальной погрешности:

$$\delta = \frac{\left(\frac{2}{3} \cdot R\right)^2 \cdot \left(R - \frac{2}{3} \cdot R\right)}{R^2 \cdot R_H} = \frac{4}{27} \cdot \frac{R}{R_H} = \frac{4}{27 \cdot \alpha_H}, \quad (88)$$

где  $\alpha_H = \frac{R_H}{R}$  – коэффициент нагрузки.

Как следует из (88) и приведенных статических характеристик преобразователя при различных коэффициентах нагрузки  $\alpha_H$  (рис. 44, в, г), с увеличением сопротивления нагрузки относительная погрешность уменьшается. В общем случае необходимо, чтобы коэффициент нагрузки был как можно больше, однако на практике его выбирают в пределах 10–100. Необходимо отметить также, что выходное напряжение преобразователя при подключении нагрузки падает из-за шунтирования сопротивлением  $R_H$  части  $r$  сопротивления потенциометра  $R$ .

Несмотря на недостатки, присущие потенциметрическим измерительным преобразователям (невысокую надежность, особенно при работе в условиях вибрации; перегрузки, обусловленные наличием скользящего контакта; сравнительно небольшую чувствительность и большой порог чувствительности), они получили широкое применение в устройствах автоматики благодаря ряду достоинств по сравнению с другими типами измерительных преобразователей:

- простота конструкции, малый вес, габариты;
- возможность работы на постоянном токе;

- возможность получения линейной статической характеристики с высокой точностью;
- стабильность характеристики;
- отсутствие фазового сдвига выходного напряжения при работе на переменном токе.

## Индуктивные датчики

Индуктивные датчики основаны на изменении индуктивного сопротивления электромагнитного дросселя при перемещении одной из его подвижных деталей, обычно якоря. Они широко применяются для измерения малых угловых и линейных механических перемещений, деформаций, контроля размеров деталей, а также для управления следящими устройствами.

Рассмотрим работу **однотактного** индуктивного преобразователя (рис. 45, а).

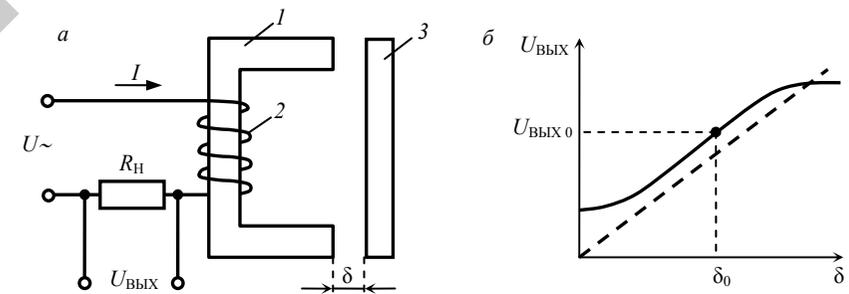


Рис. 45. Схема (а) и статическая характеристика (б) однотактного индуктивного преобразователя: 1 – сердечник; 2 – обмотка; 3 – якорь

Выходной сигнал получают в виде переменного напряжения, снимаемого с сопротивления нагрузки  $R_H$ , включенного в цепь обмотки 2, помещенной на сердечнике 1. Питание осуществляется переменным напряжением  $U$  (с частотой от 50 до нескольких тысяч герц). Под действием входного сигнала перемещается якорь 3 и изменяется зазор  $\delta$ . Выходное напряжение датчика равно

$$U_{\text{вых}} = I \cdot R_H. \quad (89)$$

Среднее значение тока в рабочей цепи преобразователя определяется по формуле:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{\sqrt{(R_H + R_0)^2 + (\omega \cdot L)^2}}, \quad (90)$$

где  $R$  – суммарное активное сопротивление цепи, Ом;  
 $R_0$  – сопротивление обмотки, Ом;  
 $X_L$  – реактивное сопротивление цепи, Ом;  
 $\omega$  – круговая частота, рад/с.

Индуктивность обмотки  $L$  является функцией размера зазора с магнитным сопротивлением  $r_\delta$ :

$$L = \frac{\omega^2}{r_\delta} = \frac{\mu_0 \cdot S \cdot w^2}{\delta}, \quad (91)$$

где  $w$  – число витков обмотки;  
 $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха в зазоре;  
 $S$  [м<sup>2</sup>] – площадь поперечного сечения зазора.

Учитывая, что на практике для индуктивных преобразователей выполняется условие  $R \ll X_L$ , и подставляя выражения (90), (91) в (89), получаем

$$U_{\text{вых}} = \frac{U \cdot R_H}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot S \cdot w^2}{\delta}\right)^2}} \approx \frac{U \cdot R_H \cdot \delta}{\omega \cdot \mu_0 \cdot S \cdot w^2} = K \cdot \delta. \quad (92)$$

**Коэффициент преобразования**  $K = \frac{U \cdot R_H}{\omega \cdot \mu_0 \cdot S \cdot w^2}$  – величина постоянная, поэтому статическая характеристика  $U_{\text{вых}} = f(\delta)$  должна представлять собой прямую, проходящую через начало координат

(рис. 45, б, штриховая линия). Реальная характеристика преобразователя, показанная на рисунке сплошной линией, отличается от идеальной. Это объясняется тем, что при малых значениях  $\delta$  допущение  $r_m \ll r_\delta$  становится неверным, так как магнитное сопротивление ферромагнитного участка магнитной цепи  $r_m$  становится соизмеримым с магнитным сопротивлением зазора  $r_\delta$ ; при больших значениях  $\delta$  падает индуктивность обмотки  $L$ , и реактивное сопротивление  $X_L$  становится соизмеримым с активным сопротивлением магнитной цепи, т. е.  $R \approx X_L$ . Это несоблюдение принятых в начале рассмотрения допущений и приводит к искажению статической характеристики.

К достоинствам нереверсивного индуктивного датчика следует отнести: высокую чувствительность; надежность и долговечность; отсутствие контактных устройств; значительную величину выходной мощности (до сотен вольт-ампер); простоту конструкции и эксплуатации.

Основными недостатками рассмотренного датчика являются: наличие напряжения на выходе при нулевом воздушном зазоре  $U_{\text{х.х.}}$ ; нелинейность реальной статической характеристики; возникновение больших усилий между якорем и сердечником дросселя (до нескольких килограммов), которые необходимо преодолевать. От перечисленных недостатков в значительной степени свободны реверсивные датчики, которые имеют чувствительность в 2 раза большую, чем нереверсивные датчики.

**Реверсивные датчики** включаются или по дифференциальной (рис. 46, а), или по мостовой схеме (рис. 46, б) и состоят из двух нереверсивных датчиков, имеющих общий якорь  $I$ . Усилие, действующее на якорь, равно разности сил притяжения со стороны сердечников 2. В среднем положении якоря при наличии полной симметрии реверсивного датчика результирующее усилие равно нулю, а в других положениях якоря оно небольшое.

Реальная **статическая характеристика** реверсивного датчика (кривая III) приведена на рис. 46, в. Она получается путем алгебраического суммирования ординат характеристик нереверсивных датчиков (кривые I и II). За начало отсчета перемещений берут среднее положение якоря, при котором схема будет уравновешена и падение напряжения на нагрузке  $U_H = 0$ . При небольших

отклонениях якоря напряжение  $U_H$  возрастает практически линейно. При изменении знака перемещения (переход якоря через среднее положение в противоположную сторону) фаза напряжения  $U_H$  меняется на  $180^\circ$ .

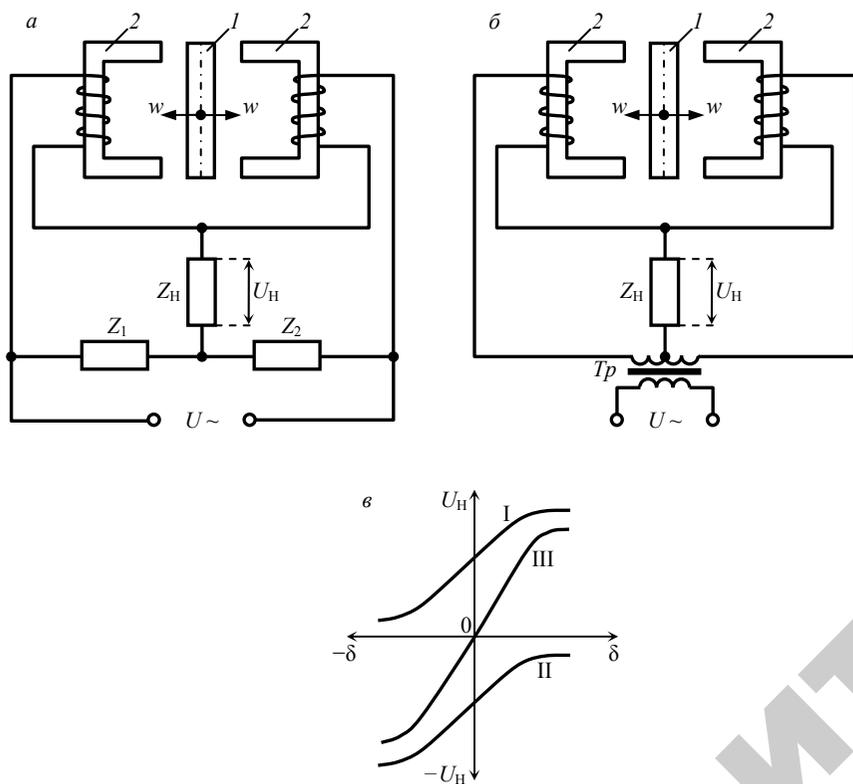


Рис. 46. Реверсивный индуктивный датчик с переменным зазором (1 – якорь; 2 – сердечники): а – дифференциальная схема включения; б – мостовая схема включения; в – статические характеристики

В настоящее время применяется большое количество индуктивных датчиков, отличающихся друг от друга по конструктивному и схемному исполнению. В автоматике наибольшее распространение получил **дифференциальный датчик**, включающийся с помощью разделительного трансформатора  $Tr$  (рис. 46, б).

К достоинствам рассмотренных реверсивных датчиков можно отнести: большую, чем у неревверсивных датчиков, линейность статической характеристики; меньшую зависимость характеристики от колебаний напряжения, температуры и т. п.

Основным недостатком реверсивных датчиков является сложность регулировки (балансировки) датчика.

### Индукционные датчики

Индукционные датчики преобразуют измеряемую неэлектрическую величину в ЭДС индукции. В этих датчиках используется явление электромагнитной индукции, заключающееся в том, что во всяком контуре, внутри которого с течением времени меняется магнитный поток, наводится (индуцируется) ЭДС.

Как известно, по закону электромагнитной индукции величина наводимой ЭДС определяется скоростью изменения магнитного потока:

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt},$$

где  $e$  [В] – мгновенное значение ЭДС;

$w$  – число витков в контуре (катушке);

$\Phi$  [Вб] – магнитный поток через площадь одного витка в контуре.

Чувствительность индукционных датчиков зависит от числа витков катушки.

В связи с тем, что наводимая ЭДС зависит от скорости изменения магнитного потока, индукционные датчики применяют для измерения скорости линейных и угловых перемещений, ускорений, параметров колебаний (амплитуды и частоты).

Из индукционных датчиков наибольшее применение нашли **тахогенераторы**, предназначенные для измерения угловой скорости и выполненные в виде генераторов постоянного или переменного тока небольшой мощности (1–100 Вт).

**Тахогенератор постоянного тока** по принципу действия и конструктивному выполнению является электрической коллекторной машиной (рис. 47, а), работающей в генераторном режиме и состоящей

из вращающейся части – якоря 3 и неподвижной части – статора. На статоре укладывается обмотка возбуждения или устанавливается постоянный магнит  $I$ . В последнем случае наводимая ЭДС зависит только от частоты вращения якоря:

$$E_{\text{ТГ}} = k_{\text{ТГ}} \cdot \omega,$$

где  $k_{\text{ТГ}}$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных параметров тахогенератора, В·с/рад;

$\omega$  – угловая частота вращения якоря, рад/с.

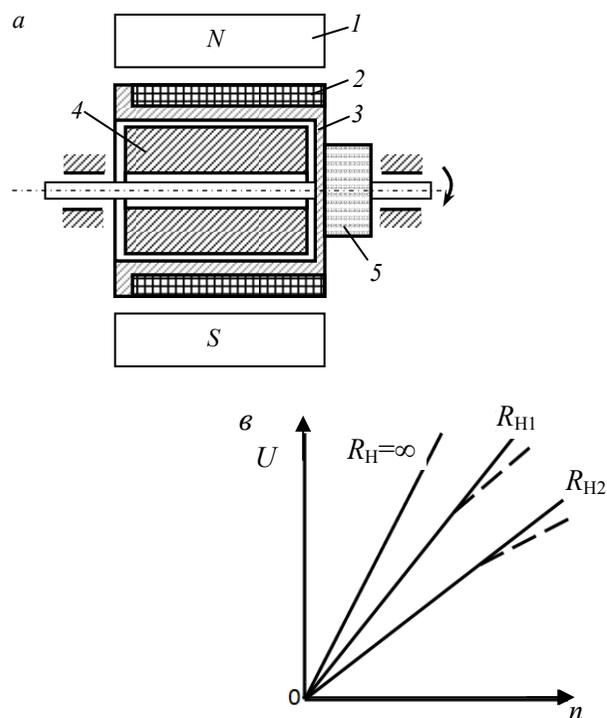


Рис. 47. Тахогенератор постоянного тока: а – устройство; б – принципиальная схема включения; в – статическая характеристика; 1 – постоянный магнит; 2 – обмотка; 3 – якорь в виде тонкостенного цилиндра; 4 – ферромагнитный сердечник; 5 – коллектор

Пропорциональная зависимость  $E_{\text{ТГ}}$  от частоты вращения  $\omega$  справедлива только для ненагруженного тахогенератора ( $R_{\text{H}} = \infty$ ). При работе тахогенератора на нагрузку  $R_{\text{H}}$  (рис. 47, б) напряжение на его зажимах определяется выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{ТГ}} - I_{\text{H}} \cdot R_{\text{я}},$$

где  $I_{\text{H}} = \frac{E_{\text{ТГ}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{H}}}$ ;

$R_{\text{я}}$  – сопротивление обмотки якоря, Ом.

При больших значениях  $R_{\text{H}}$  ток  $I_{\text{H}}$  мал, падение напряжения  $I_{\text{H}} \cdot R_{\text{я}}$  также мало, и частота вращения может быть определена довольно точно. Если сопротивление нагрузки  $R_{\text{H}}$  мало, то линейная зависимость между  $U_{\text{ВЫХ}}$  и  $\omega$  нарушается (рис. 47, в).

Если поток создается током возбуждения, то его можно изменять, тогда ЭДС тахогенератора будет зависеть и от частоты вращения, и от тока возбуждения. При ненасыщенной магнитной цепи магнитный поток можно считать прямо пропорциональным силе тока возбуждения  $I_{\text{а}}$ .

Это позволяет использовать тахогенератор с независимым возбуждением для умножения двух величин, из которых одна выражена током возбуждения, а другая – частотой вращения.

Тахогенераторы постоянного тока имеют значительные погрешности, обусловленные температурной нестабильностью (изменением сопротивления обмоток и магнитной проницаемости) и нестабильностью щеточного контакта.

К тахогенераторам переменного тока относятся асинхронные (двухфазные) и синхронные. **Асинхронный тахогенератор** – это, по существу, маломощный двухфазный асинхронный двигатель с полым тонкостенным ротором и двумя обмотками на статоре: возбуждения и сигнальной (генераторной). Обмотку возбуждения подключают к сети, а генераторную – к измерительному прибору или усилительной схеме. С помощью асинхронных тахогенераторов можно измерять ускорение. В этом случае на обмотку возбуждения подается постоянное напряжение питания, тогда напряжение, снимаемое с сигнальной обмотки, будет пропорционально второй производной от угла поворота ротора.

Асинхронные тахогенераторы имеют ряд преимуществ по сравнению с тахогенераторами постоянного тока: простота устройства; эксплуатационная надежность; отсутствие коллектора и щеток; высокое быстродействие (малая электромеханическая постоянная времени).

Асинхронные тахогенераторы находят также применение в схемах счетно-решающих устройств и в автоматических системах регулирования для осуществления обратных связей по скорости.

Синхронные тахогенераторы применяются относительно редко, так как им свойственны существенные недостатки.

### Программируемые логические контроллеры Simatic S7-1200

Программируемый логический контроллер Simatic S7-1200 (рис. 48) объединяет в компактном корпусе микропроцессор, встроенный блок питания, входные и выходные цепи. ПЛК серии S7-1200 имеют модульную конструкцию, т. е. к центральному процессору (ЦПУ) ПЛК S7-1200 при необходимости увеличения числа обрабатываемых информационных сигналов могут быть подключены коммуникационные модули (CM), сигнальные модули (SM) и сигнальные платы (SB) ввода/вывода дискретных и аналоговых сигналов (табл. 8).

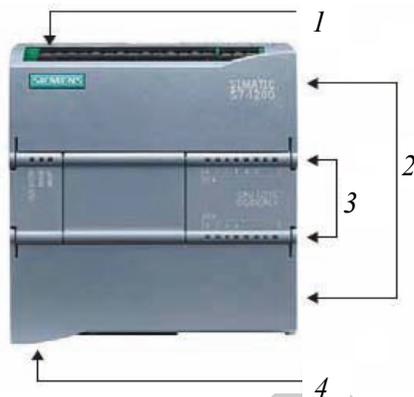


Рис. 48. Внешний вид ПЛК Simatic S7-1200: 1 – разъем питания; 2 – съемный клеммный блок для подключения пользователя (за дверцами); 2 – гнездо для карты памяти (под верхней дверцей); 3 – светодиоды состояния для встроенных входов/выходов; 4 – разъем PROFINET

Чтобы обеспечить поступление информации о состоянии объекта управления, необходимо обеспечить подключение различных датчиков параметров технологических процессов к входам контроллера. С точки зрения схем подключения, датчики можно разделить на датчики с унифицированным выходом и специализированные. Унифицированные выходы включают три типа: выход типа «ключ»; непрерывный, с информационным сигналом в виде тока, напряжения или частоты импульсов; сетевые, когда для передачи данных используются протоколы локальных вычислительных сетей. Если датчик не имеет унифицированного выхода, как, например, термометр сопротивления металлический ТСП, то необходимо наличие специализированных входных модулей в составе контроллера.

Таблица 8

Технические характеристики ПЛК Simatic S7-1200

Параметры	Значения
Напряжение питания	+24 В постоянного тока
Встроенная загрузаемая память	2 МБ
Встроенная рабочая память	50 КБ
Энергонезависимая память для сохранения данных при перебоях в питании	2 КБ
Битовая память (М)	8192 байта
ПИД-регулирование	Поддержка 16 контуров
Скоростные счетчики	3×100 кГц + 3×30 кГц
Импульсные выходы	2×100 кГц
Встроенные аппаратные часы реального времени	Запас хода без подключения питания – 240 часов
Интерфейс Ethernet	1×RJ45, 10/100 Мбит/с
Встроенные входы и выходы	2 аналоговых входа 0–10 В / 10 бит;
	14 цифровых входов, 24 В;
	10 цифровых выходов, 24 В / 0,5 А на основе транзисторных ключей

Параметры	Значения
Количество каналов системы локального ввода/вывода:	
- каналов ввода/вывода дискретных сигналов, не более;	144/140
- каналов ввода/вывода аналоговых сигналов, не более	34/17

Широко распространены датчики с выходом типа «ключ», т. е. имеющие два состояния: технологический параметр достиг заданного значения или нет. В качестве примера можно привести датчики конечного положения с выходом в виде механического контакта или транзисторного ключа. Такие датчики называют бинарными или дискретными. Схемы подключения датчиков и исполнительных механизмов к программируемым контроллерам унифицированы. Дискретные входы (discreet input, DI), как правило, рассчитаны на напряжение 24 В и потребляют ток в диапазоне 4–10 мА (рис. 49).

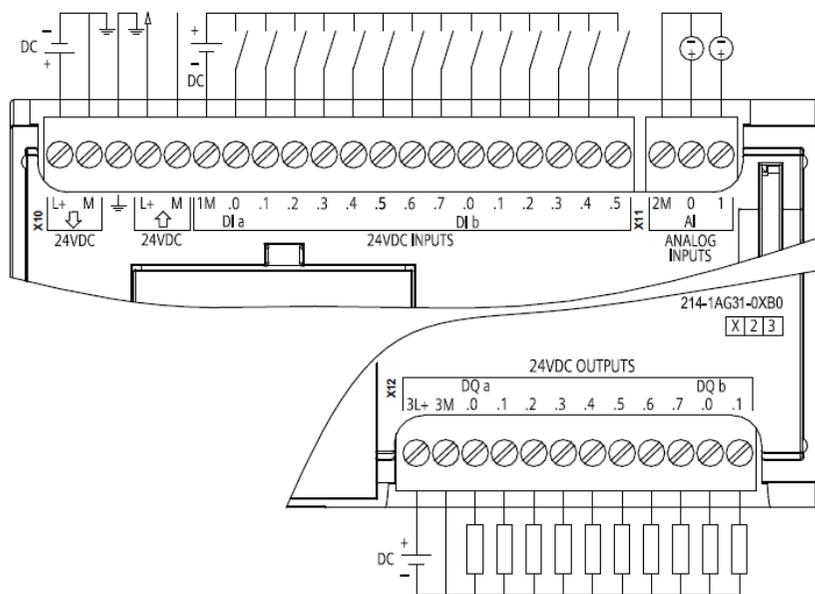


Рис. 49. Схема подключения внешних устройств ко входам и выходам контроллера

При замыкании контакта напряжение 24 В поступает на дискретный вход контроллера, например DIa.0. В этом случае операционная система контроллера записывает в соответствующую однобитовую ячейку памяти входов состояние входа DIa.0 как логическую 1 (TRUE), при размыкании контакта и отсутствии напряжения на входе записывается состояние логический 0 (FALSE). Такие типы сигналов являются широко распространенными. В качестве источника дискретного сигнала может выступать не только механический контакт, имеющий два состояния «замкнут/разомкнут», но и любой электронный прибор. Таким прибором наиболее часто является транзистор в ключевом режиме. Но обычные дискретные входы контроллеров рассчитаны на сигналы, длительность которых должна превышать время выполнения цикла прикладной программы. Цикл выполнения программы является внутренней характеристикой конкретного контроллера и может изменяться в широких диапазонах, например 10–500 мс. Если необходимо воспринимать информацию с датчиков, имеющих высокочастотный импульсный выход, например в диапазоне 0–2000 кГц используются специализированные входы контроллера, способные работать в режиме высокочастотного счетчика. Таким образом, подключение датчиков с дискретным сигналом является достаточно тривиальной задачей, не требующей глубоких знаний электроники.

Пользователь имеет доступ только к клеммникам контроллера, однако полезно владеть информацией о входном каскаде, который и осуществляет первичную обработку сигнала (рис. 50).

Для повышения помехоустойчивости связь внешних электрических сигналов с внутренней схемой контроллера осуществляется через оптрон, выполняющий функцию гальванической развязки цепей питания внешних датчиков от цепей питания внутренних микросхем ПЛК. Наличие гальванической развязки препятствует проникновению внешних помех во внутренние электрические схемы контроллера и повышает надежность его функционирования.

Вывод дискретных сигналов используется для управления состоянием включено/выключено исполнительных устройств. Устройства вывода отличаются большим многообразием. Знание структуры выходных каскадов необходимо для правильного их применения. Выходные платы также нуждаются в некотором изолирующем барьере, чтобы ограничить ущерб от возможных неисправностей

на стороне объекта и исключить электрические помехи, нарушающие работу процессора (рис. 51).

На лабораторной стенде имеются модули ввода/вывода цифровых и аналоговых сигналов, предназначенные для учебной имитации подачи на контроллер внешних входных и снятия с контроллера управляющих выходных сигналов (рис. 52).

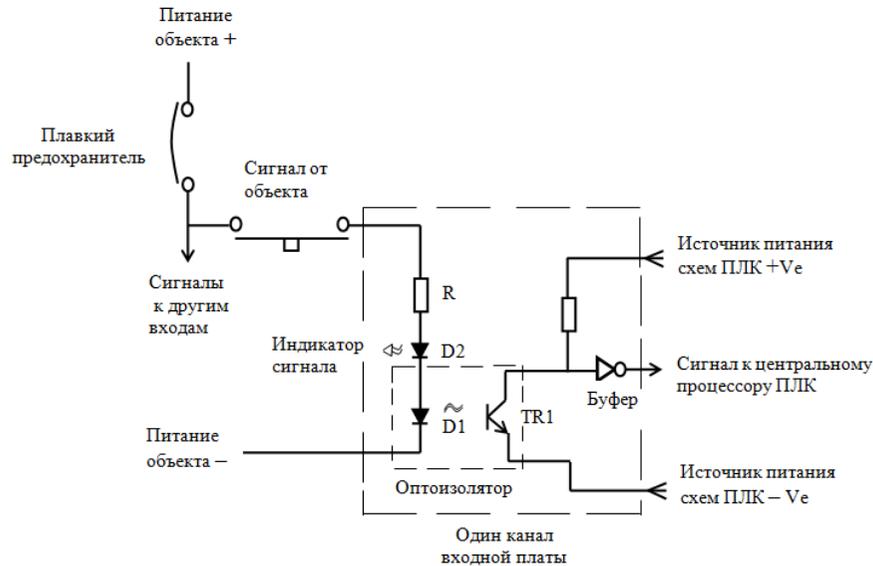


Рис. 50. Типовая схема первичного каскада дискретного входа

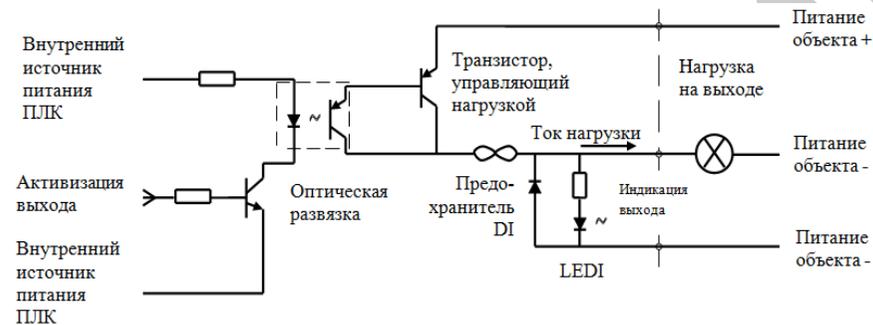


Рис. 51. Типовая схема каскада транзисторного выхода ПЛК



Рис. 52. Модули ввода/вывода цифровых и аналоговых сигналов

Модуль Festo 8DIn (рис. 52, а) – источник входных цифровых сигналов. Позволяет подавать на цифровые входы контроллера одновременно до 8 дискретных сигналов постоянного напряжения +24 В.

Модуль Festo 8DOut (рис. 52, б) – приемник выходных цифровых сигналов. Содержит 8 светодиодных индикаторов уровней выходных цифровых сигналов контроллера и позволяет передавать их на внешнюю нагрузку через соединительные разъемы.

Модуль Festo 4AI/2AO (рис. 52, в) – модуль ввода/вывода аналоговых сигналов. Модуль обеспечивает подачу на аналоговые входы контроллера до 4 аналоговых сигналов в диапазоне от 0 до 10 В постоянного напряжения. При переключении соответствующего тумблера в верхнее положение значение аналогового напряжения задается вращением ручки потенциометра. При переключении тумблера в нижнее положение аналоговое напряжение может быть подано от внешнего источника при подключении его через электрический разъем (4 мм). Модуль обеспечивает также отображение значений двух сигналов с аналоговых выходов контроллера в диапазоне от -10 до +10 В постоянного напряжения с возможностью подключения нагрузки. Значение аналогового напряжения отображается на цифровом вольтметре.

В качестве выхода аналогового сигнала контроллера на его передней стороне имеется аналоговая сигнальная плата SB 1223 AQ 1x12bit. Схема подключения нагрузки к единственному аналоговому выходу показана на рис. 53.

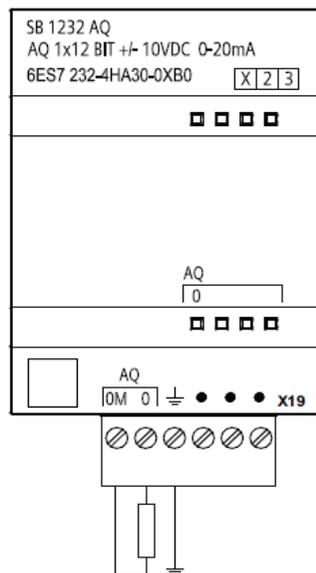


Рис. 53. Схема подключения нагрузки к аналоговому выходу ПЛК

Сенсорная панель оператора КТР700 Basic предназначена для визуализации параметров процесса (объекта) и/или осуществления операторского управления. Сенсорная панель оператора позволяет реализовать следующие функции человеко-машинного интерфейса:

- отображение параметров технологического процесса (или объекта) в текстовом или графическом режимах;
- управление и обработку аварийных сообщений, регистрацию времени и даты возникновения аварийных сообщений;
- ручное управление с помощью функциональных кнопок или сенсорного экрана;
- построение диаграмм и трендов, отображение сводных отчетов;
- возможность программирования графики и настройки функциональных клавиш.

Аппаратная архитектура панели устроена по подобию обычных персональных компьютеров, только вместо жесткого диска используется flash-память. Типовая панель состоит из следующих аппаратных компонентов:

- процессора;
- оперативной памяти небольшого объема;
- встроенной flash-EEPROM памяти (ПЗУ) для хранения ОС и накопления пользовательских данных;
- различных слотов расширения и интерфейсов для подключения программатора и/или сети передачи данных.

Сенсорная панель КТР700 Basic имеет следующие характеристики:

- напряжение питания – +24 В постоянного тока;
- разрешение экрана – 800×480 точек;
- объем доступной для хранения пользовательских данных оперативной памяти – 10 Мб;
- 1 слот для подключения устройств USB объемом до 16 Гб;
- 1 слот для сетевого подключения по стандарту Industrial Ethernet;
- поддерживаемые протоколы передачи данных: PROFINET, TCP/IP, DHCP, SNMP, DCP, LLDP, MODBUS.

Коммутатор SCALANCE XB005 используется для сетевого соединения компьютера (устройства программирования), ПЛК Simatic S7-1200 и сенсорной панели оператора (рис. 54).

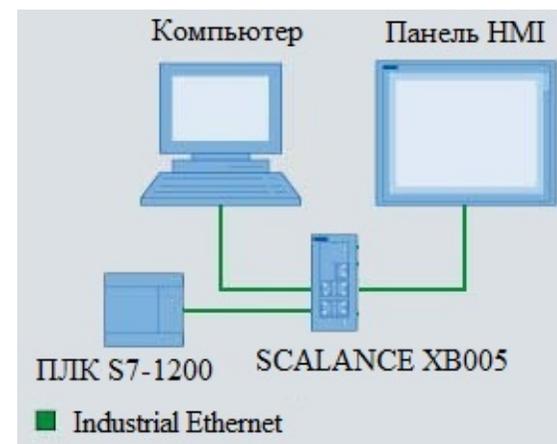


Рис. 54. Звездообразная топология сети на лабораторном стенде

По включению питания встроенная в ПЛК операционная система выполняет самотестирование и настройку аппаратных ресурсов, очистку оперативной памяти данных (ОЗУ), контроль целостности прикладной программы пользователя. Если прикладная программа сохранена в памяти программ, ПЛК переходит к основной работе, которая состоит из постоянного повторения последовательности действий, входящих в рабочий цикл. В самом начале цикла ПЛК производит физическое чтение входов. Считанные значения входных сигналов размещаются в области памяти входов. Таким образом, создается одномоментная зеркальная копия значений входов. Далее выполняется код пользовательской программы. Пользовательская программа работает с копией значений входных и выходных сигналов, размещенной в соответствующих областях (I-область и Q-область) системной памяти данных. После выполнения кода пользовательской программы операционная система ПЛК выполняет копирование расчетных значений выходных сигналов из Q-области памяти на физические выходы ПЛК (рис. 55).

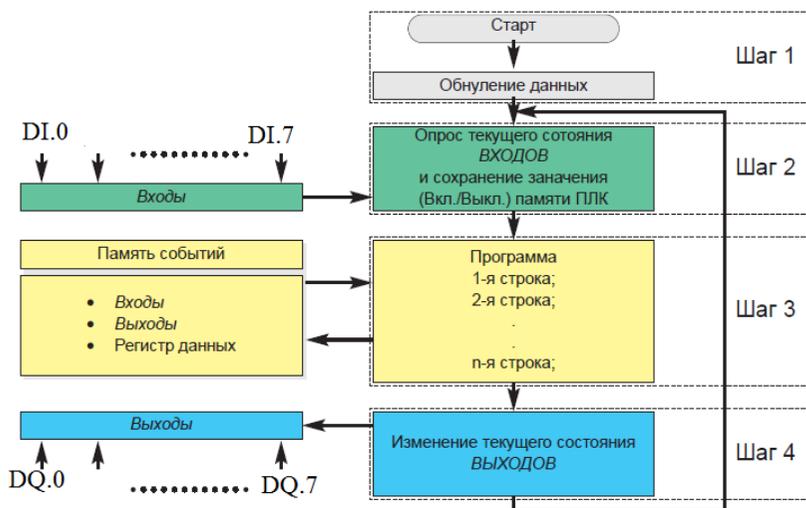


Рис. 55. Цикл выполнения управляющей программы пользователя в ПЛК

Такая последовательность действий, включающая замер, обсчет и выработку воздействия, называется рабочим циклом ПЛК или прогоном программы. Время выполнения цикла программы может

варьироваться в широких пределах, например 10–500 мс. Таким образом, вычисления в ПЛК всегда повторяются циклически. Выполняемые действия зависят от значения входов контроллера, предыдущего состояния и определяются пользовательской программой.

## Разработка программ на ПЛК

Для разработки программ на ПЛК в настоящее время используются интегрированные среды разработки (ИСП, англ. IDE – Integrated development environment), содержащие в своем составе текстовые редакторы, компиляторы, редакторы связей, загрузчики и симуляторы. ИСП обычно представляет собой единственную программу, в которой проводится вся разработка. Она, как правило, содержит много функций для создания, изменения, компилирования, развертывания и отладки программы ПЛК [1].

TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) – интегрированная среда разработки программного обеспечения систем автоматизации технологических процессов на основе оборудования производства фирмы Siemens. В TIA Portal объединены три основных программных пакета:

- Simatic Step 7 v.11 для программирования контроллеров S7-1200, S7-300, S7-400 и WinAC;
- Simatic WinCC v.11 для разработки человеко-машинного интерфейса (программирование сенсорных панелей и SCADA-систем);
- Sinamics StartDrive v.11 для программирования преобразователей частоты Sinamics.

В среде TIA Portal предусмотрено два способа отображения структуры проекта автоматизации: порталное представление (portal view) и проектно-ориентированное представление (project view). Портальное представление (рис. 56) отображает структуру проекта с точки зрения задач и функций, которые могут быть выполнены в проекте, например, создание нового проекта (Create new project), открытие уже созданного ранее и сохраненного на жестком диске проекта (Open existing project), отображение используемых в проекте устройств (контроллеров, панелей оператора, модулей ввода/вывода и др.) и настройку сетевых соединений между устройствами (Devices & networks), мониторинг и диагностика доступных для программирования в данном проекте устройств (Online & Diagnostics) и др.

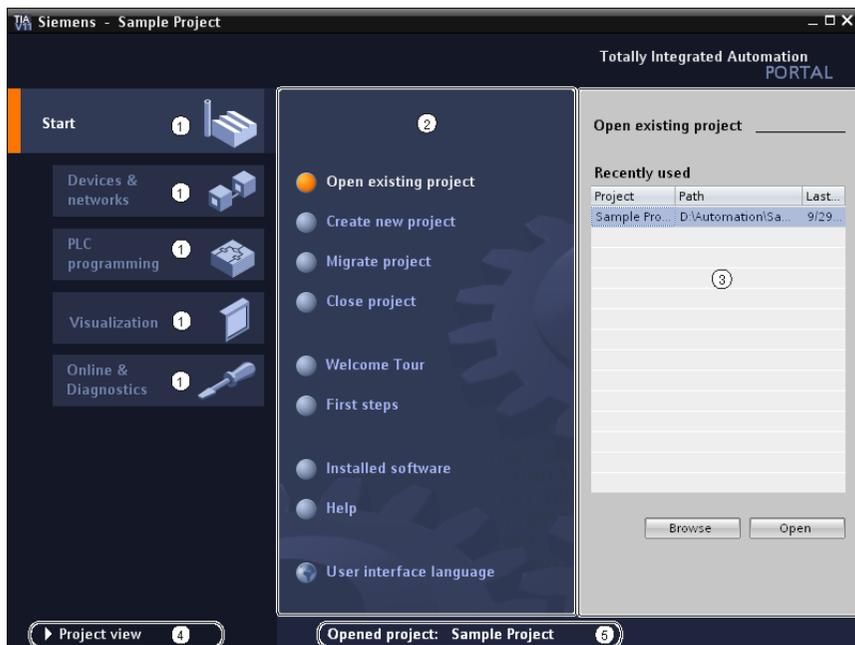


Рис. 56. Портальное представление структуры проекта (portal view): 1 – панели задач; 2 – действия для выбранной задачи; 3 – панель выбора вариантов для указанного действия; 4 – переход к проектно-ориентированному представлению; 5 – название открытого проекта

Проектно-ориентированное представление (рис. 57) отображает все компоненты внутри проекта и позволяет получить быстрый доступ к любому из них. В процессе работы над проектом при необходимости в любой момент можно переключиться от портального к проектно-ориентированному представлению структуры проекта и обратно.

### Структура программы

В зависимости от сложности решаемой задачи управления для программы пользователя может быть выбрана линейная либо модульная структура (рис. 58).

В линейной программе все команды программы выполняются последовательно друг за другом и находятся в одном кодовом блоке, называемом организационным блоком (OB 1).

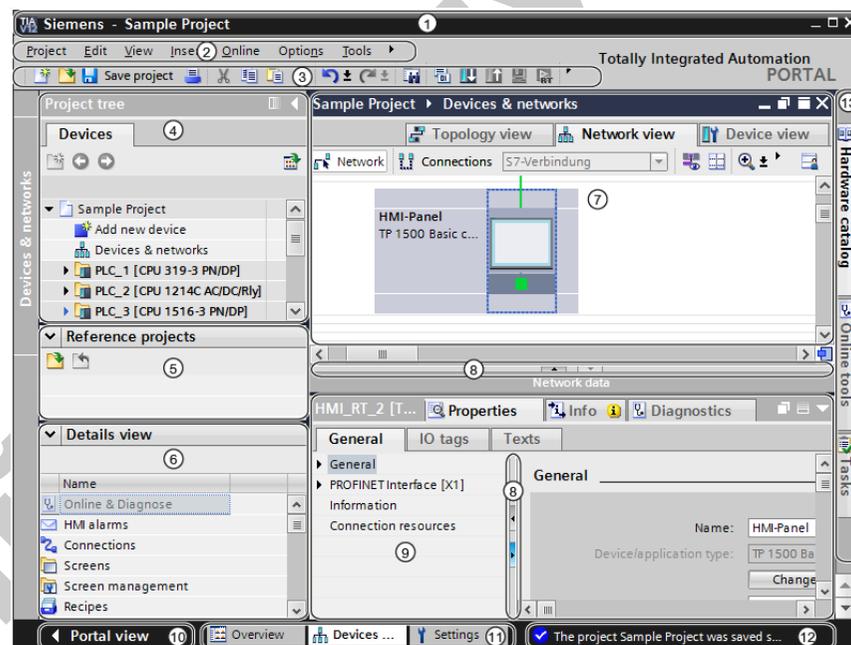


Рис. 57. Проектно-ориентированное представление структуры проекта (project view): 1 – панель заголовка (название проекта); 2 – главное меню; 3 – панель кнопок управления; 4 – дерево проекта; 5 – отображение других проектов, связанных с данным проектом; 6 – подробные данные об объекте, выбранном в дереве проекта; 7 – рабочая область окна; 8 – разделители; 9 – окно инспектора свойств объектов; 10 – переход к портальному представлению; 11 – панель переключения между задачами; 12 – строка состояния; 13 – панель вкладок библиотек компонентов

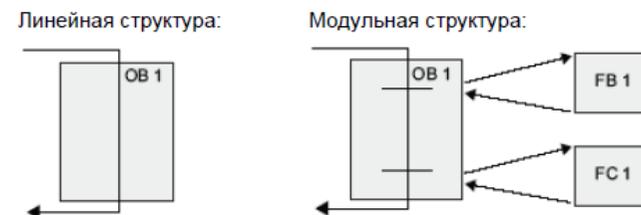


Рис. 58. Линейная и модульная структуры программы пользователя

Модульная программа вызывает специальные кодовые блоки, которые выполняют отдельные подзадачи общей задачи управления. Для создания модульной структуры сложная задача автоматизации

делится на более простые подзадачи, соответствующие технологическим функциям процесса.

В ПЛК Simatic S7-1200 имеется три типа кодовых блоков:

1. Организационный блок (OB) реагирует на определенное событие в CPU и может прервать исполнение программы пользователя. Стандартный блок для исполнения программы пользователя (OB 1) предоставляет основную структуру пользовательской программы и является единственным кодовым блоком, необходимым для пользовательской программы. Если вы вставите другие OB в свою программу, то эти OB прерывают исполнение OB 1. Другие OB выполняют специфические функции, например: для задач запуска, для обработки прерываний и ошибок или для исполнения конкретного программного кода через определенные интервалы времени.

2. Функциональный блок (FB) – это подпрограмма, которая исполняется при вызове из другого кодового блока (OB, FB или FC). Вызывающий блок передает параметры в FB, а также определяет некоторый блок данных (DB), который сохраняет данные для этого вызова или экземпляра этого FB. Изменение экземплярного DB позволяет родовому FB управлять работой группы устройств. Например, один FB может управлять несколькими насосами или вентилями с помощью различных экземплярных DB, содержащих конкретные рабочие параметры для каждого насоса или вентиля.

3. Функция (FC) – это подпрограмма, которая исполняется при вызове из другого кодового блока (OB, FB или FC). У FC нет связанного с ней кодового блока данных DB. Вызывающий блок передает параметры в FC. Выходные значения FC должны быть записаны в адреса памяти или в глобальный DB.

В качестве примера модульной структуры программы можно привести подробно рассмотренную ниже задачу управления температурой и уровнем воды в водогрейном котле (рис. 59). Данная задача может быть структурно разделена на две подзадачи:

– регулирование уровня воды в котле: обеспечивается управлением работой входного и выходного клапанов на основе сигналов датчиков уровня;

– регулирование температуры воды: обеспечивается периодическим включением и выключением электронагревателя с учетом сигналов датчиков температуры.

Соответственно, программа может быть представлена в виде двух кодовых организационных блоков: Temperature Control [OB 1] (контроль температуры) и Water Level Control [OB 123] (контроль уровня воды), которые в процессе прогона программы будут выполняться последовательно один за другим, как это схематически показано на рис. 59.

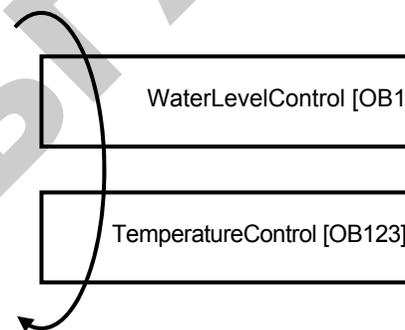


Рис. 59. Модульная структура программы управления водогрейным котлом

### Понятие переменной. Адресация переменных, типы данных

Переменная – это область памяти контроллера для хранения данных определенного типа. Каждая переменная характеризуется своим адресом и длиной, которая зависит от типа хранимых данных. При обращении в программе к переменной для считывания или записи данных нужно указать адрес этой переменной. В языках программирования высокого уровня есть два способа указания адреса переменной: абсолютный адрес и символичный адрес. При указании абсолютного адреса переменной нужно указать область памяти контроллера, в которой она находится, размер переменной, номер начального байта, и, при необходимости, номер бита. Например, I0.1, Q0, MW20. Первая буква определяет область памяти контроллера (подробнее об этом будет рассказано чуть ниже). Вторая буква определяет размер переменной в байтах: B (byte) – 1 байт, W (word) – 2 байта, D (double word) – 4 байта. Однако такой способ указания адреса не всегда удобен и при

Области памяти ПЛК для хранения данных

Область памяти	Описание
I Образ процесса на входах ПЛК	В начале каждого цикла (прогона) копируется из физических входов
I_:P Физический вход	Непосредственное чтение физических входов ЦПУ, сигнальной платы (SB) или сигнального модуля (SM)
Q Образ процесса на выходах	В начале каждого цикла (прогона) копируется в физические выходы
Q_:P Физический выход	Непосредственная запись в физические выходы ЦПУ, SB или SM
M Битовая память	Управление и память данных
L Временная память	Временные, локальные данные для блока
DB Блок данных	Память данных, а также память параметров для FB

**I (образ процесса на входах ПЛК):** CPU опрашивает периферические (физические) входы в каждом цикле непосредственно перед исполнением циклического ОВ и записывает эти значения в образ процесса на входах. Можно обращаться к образу процесса на входах побитно, побайтно, пословно или используя двойные слова. Разрешается доступ как на чтение, так и на запись, но обычно входы образа процесса только считываются.

Таблица 10

Обращение к переменной из I области по абсолютному адресу

Размер переменной	Адрес	Пример
Бит	I[адрес байта].[адрес бита]	I0.1
Байт, слово или двойное слово	I[размер][адрес начального байта]	IB4, IW5, ID12

Добавляя к адресу «:P», можно непосредственно считывать цифровые и аналоговые входы ЦПУ, SB или SM. Доступ через I\_:P отличается от доступа через I тем, что данные получаются непосредственно с входов, к которым производится обращение, а не из

использовании в программе большого количества переменных может привести к путанице при написании программы. Поэтому можно использовать символьное указание адреса, при котором с абсолютным адресом переменной связывается некоторое состоящее из символов слово (имя переменной), имеющее для программиста определенный понятный ему смысл. Так, например, если к дискретному входу контроллера I0.1 подключена кнопка пуска двигателя, то с адресом I0.1 можно связать символьное имя данной переменной ButtonStart. Для одной переменной может быть задано только одно символьное имя.

Для задания символьных имен переменных в Simatic Step 7 предусмотрены таблицы символьных имен – PLC tags. Для открытия таблицы символьных имен необходимо в дереве проекта (Project tree) выбрать пункт PLC\_1 → PLC tags → Default tag table, в результате чего откроется таблица Default tag table, автоматически создаваемая средой Simatic Step 7 для каждого проекта. Структура таблицы показана в табл. 9. Для определения символьного имени переменной необходимо задать само символьное имя (Name), указать ее тип данных (Data type), абсолютный адрес (Adress) и, при необходимости, комментарий.

ЦПУ предоставляет несколько возможностей для сохранения данных во время исполнения программы пользователя:

1. Глобальная память: ЦПУ предоставляет ряд специализированных областей памяти, включая входы (I), выходы (Q) и битовую память (меркеры) (M). Эта память доступна для всех кодовых блоков без ограничения.

2. Блок данных (DB): может быть включен в программу для сохранения данных для кодовых блоков. Эти данные сохраняются после исполнения соответствующего кодового блока. В «глобальном» DB сохраняются данные, которые могут быть использованы всеми кодовыми блоками, тогда как в экземплярном DB хранятся данные только для конкретного FB, и они структурированы в соответствии с параметрами этого FB.

3. Временная память: при вызове кодового блока операционная система ЦПУ выделяет временную, или локальную, память (L) для использования во время исполнения этого блока. Когда исполнение кодового блока заканчивается, ЦПУ выделяет эту локальную память для исполнения другого блока.

образа процесса на входах. Доступ через I\_:P называется также прямым доступом на чтение, так как данные считываются прямо из источника, а не из его копии, которая была сделана при последнем обновлении образа процесса на входах.

Таблица 11

Обращение к переменной из I\_:P области по абсолютному адресу

Размер переменной	Адрес	Пример
Бит	I[адрес байта].[адрес бита]:P	I0.1:P
Байт, слово или двойное слово	I[размер][адрес начального байта]:P	IB4:P, IW5:P, ID12:P

Так как физические входы получают свои значения непосредственно из подключенных к ним полевых устройств, то запись в эти входы запрещена. То есть доступ через I\_:P является доступом только на чтение, в отличие от доступа к I, который возможен как на считывание, так и на запись.

**Q (образ процесса на выходах):** CPU копирует значения, хранящиеся в образе процесса на выходах в физические выходы. К образу процесса на выходах можно обращаться побитно, побайтно, пословно или используя двойные слова. К выходам образа процесса разрешается доступ как на чтение, так и на запись.

Таблица 12

Обращение к переменной из P области по абсолютному адресу

Размер переменной	Адрес	Пример
Бит	Q[адрес байта].[адрес бита]	Q0.1
Байт, слово или двойное слово	Q[размер][адрес начального байта]	QB4, QW5, QD12

Добавляя к адресу «:P», можно осуществлять непосредственную запись в физические цифровые и аналоговые выходы ЦПУ, SB или SM. Доступ через Q\_:P отличается от доступа через Q тем, что данные поступают непосредственно на выходы, к которым осуществляется обращение, и, кроме того, в образ процесса на выходах (запись осуществляется в оба места). Доступ через Q\_:P иногда называют прямым доступом, так как данные посылаются прямо на целевой адрес, которому не приходится ждать следующего обновления образа процесса на выходах.

Таблица 13

Обращение к переменной из Q\_:P области по абсолютному адресу

Размер переменной	Адрес	Пример
Бит	Q[адрес байта].[адрес бита]:P	Q0.1:P
Байт, слово или двойное слово	Q[размер][адрес начального байта]:P	QB4:P, QW5:P, QD12:P

Так как физические выходы непосредственно управляют полевыми устройствами, подключенными к этим выходам, то чтение с этих выходов запрещено. Т. е. доступ через Q\_:P является доступом только на запись, в отличие от доступа через Q, при котором возможно как чтение, так и запись.

**M (область битовой памяти, M-память):** эту область памяти можно использовать для управляющих реле и данных, чтобы хранить промежуточные результаты операций или другую управляющую информацию. К области битовой памяти можно обращаться побитно, побайтно, пословно или используя двойные слова. Для битовой памяти возможен доступ как на чтение, так и на запись.

Таблица 14

Обращение к переменной из M области по абсолютному адресу

Размер переменной	Адрес	Пример
Бит	M[адрес байта].[адрес бита]	M0.1
Байт, слово или двойное слово	M[размер][адрес начального байта]	MB4, MW5, MD12

**L (временная память):** CPU выделяет временную память по мере необходимости. CPU выделяет временную память кодовому блоку в момент его запуска (для OB) или вызова (для FC или FB). При выделении временной памяти кодовому блоку могут повторно использоваться те же адреса временной памяти, которые перед этим были использованы другим OB, FC или FB. CPU не инициализирует временную память в момент выделения, поэтому она может содержать любые значения.

Временная память подобна M-памяти за одним важным исключением: область действия M-памяти «глобальна», а область действия временной памяти «локальна»:

Тип данных	Размер	Диапазон	Примеры значений
Word	2 байта	от 0 до 65535	607, 1112
DWord	4 байта	от 0 до 4294967295	13042014, 14121981
Char	1 байт	от 0 до 255	'A', 't', '@'
SInt	1 байт	от -128 до 127	-123, 123
Int	2 байта	от -32768 до 32767	-3505, 26648
Dint	4 байта	от -2147483648 до 2147483647	-25, 6071952, 11121942
USInt	1 байт	от 0 до 255	33
UInt	2 байта	от 0 до 65535	44444
UDInt	4 байта	от 0 до 4294967295	55555555
Real	4 байта	от $\pm 1.18 \cdot 10^{-38}$ до $\pm 3.40 \cdot 10^{38}$	-0.1, 10.25
LReal	8 байт	от $\pm 2.23 \cdot 10^{-308}$ до $\pm 1.79 \cdot 10^{308}$	-0.0001, 123.456789

– М-память: любой OB, FB и любая FC может обратиться к данным в М-памяти, т.е. данные находятся глобально в распоряжении всех элементов программы пользователя;

– временная память: доступ к данным во временной памяти ограничен тем OB, FB или той FC, где были созданы или объявлены адреса во временной памяти. Адреса временной памяти остаются локальными и не могут быть использованы другими кодовыми блоками, даже если кодовый блок вызывает другой кодовый блок. Например, если OB вызывает FC, то FC не может обратиться к временной памяти OB, вызвавшего эту функцию.

К временной памяти можно обращаться только с использованием символической адресации.

**DB (блок данных):** обычно используется для хранения различных типов данных, включая промежуточные результаты операций или другие управляющие параметры для FB, и структуры данных, необходимые для многих команд, например таймеров и счетчиков. Для обращения к переменным, находящимся в блоке данных, необходимо использовать символическую адресацию.

Таблица 15

Обращение к переменной из блока данных с помощью символической адресации

Адрес	Пример
[имя блока данных][имя переменной]	"IEC_Timer_0_DB".PT, "My_DB".MyVar

Каждая переменная имеет определенный тип. Тип переменной определяет ее размер в байтах и описывает свойства переменной, то есть диапазон значений или точности числа, сохраненного в переменной, или какие операции являются возможными с этой переменной. ПЛК Simatic S7-1200 поддерживает простые числовые типы данных, перечисленные в табл. 16.

Таблица 16

Типы данных

Тип данных	Размер	Диапазон	Примеры значений
Bool	1 бит	от 0 до 1	TRUE, FALSE, 0, 1
Byte	1 байт	от 0 до 255	10, 107, 220

## Основы алгоритмического языка Structured Control Language

Несмотря на значительное разнообразие производителей контроллеров и систем программирования, международный стандарт МЭК 61131-3 определяет пять основных языков программирования контроллеров (табл. 17).

Выбор конкретного языка программирования зависит от субъективного опыта разработчика. Если ставится задача логического управления, наглядным является использование графических языков программирования. При этом программа внешне напоминает принципиальную электрическую схему: релейно-контактную или электронную логики. Но использование текстовых языков программирования позволяет решать не только логические задачи на основе алгебры Буля, но и использовать весь арсенал математики, начиная с арифметики, включая интегральное и дифференциальное исчисление и базы данных.

Таблица 17

Языки программирования промышленных контроллеров,  
принятые международным стандартом МЭК 61131-3

Название	Название полное		Описание
IL	Instruction List	Список инструкций	Текстовый ассемблероподобный язык низкого уровня
LD	Ladder Diagram	Релейно-контактные схемы	Графический язык, программная реализация релейно-контактных схем
FBD	Function Block Diagram	Функциональные блочные диаграммы	Графический язык. Каждый ФБ имеет входы (слева) и выходы (справа)
SFC	Sequential Function Chart	Последовательные функциональные диаграммы	Графический высокоуровневый язык. Создан на базе математического аппарата сетей Петри
ST	Structured Text	Структурированный текст	Текстовый паскалеподобный язык программирования высокого уровня

Step7-SCL (Structured Control Language – Структурный управляющий язык) – это текстовый язык высокого уровня, разработанный компанией Siemens для программирования контроллеров серии Simatic. Язык SCL является текстовым паскалеподобным языком программирования высокого уровня и соответствует определенному в международном стандарте МЭК 61131-3 текстовому языку ST.

Для языка SCL определены следующие общие правила синтаксиса:

- одна команда может быть введена в несколько строк;
- каждая команда завершается символом «;» (точка с запятой);
- нет разницы между строчными и прописными буквами;
- комментарии в программе служат только для ее пояснения и не влияют на ее исполнение.

Язык SCL включает следующие виды команд:

- команды присвоения значений (Value assignments) присваивают переменной некоторое значение (явно указанное значение: константу, результат некоторого выражения либо значение другой переменной);
- команды контроля последовательности выполнения программы (Instructions for program control) для организации условных переходов, ветвлений (IF ... THEN ... ELSE ...), циклов (FOR ... TO ... DO ...) и т. д.;
- прочие команды: арифметические, логические операции, операции преобразования и округления, перемещения блоков данных и др., представленные на панели Instructions;
- команды вызова программных блоков (block calls): таймеров, счетчиков, ПИД-регуляторов и т. д.

SCL обеспечивает стандартные *арифметические функции (операторы)*:

- = присваивание;
- + сложение;
- вычитание и отрицательное значение;
- \* умножение;
- / деление;

Эти операторы могут использоваться на числовых переменных в выражениях для выполнения вычислений и должны быть помещены между двумя переменными (как в обычной математике):

```
"x" := 5;
"y" := -10;
"z" := "x";
"out" := "x" - "y";
"out" := 2 * "x" - "z" * "y";
"out" := (10 * "x" + "y") / 4;
```

Основными *операторами двоичной логики* являются операторы NOT, AND, OR, XOR (см. табл. 18), которые определяют классические логические функции: инверсию, логическое умножение (И), логическое сложение (ИЛИ) и исключающее ИЛИ:

```
"out" := NOT "in1";
"out" := "in1" AND "in2";
"out" := "in1" OR "in2";
"out" := "in1" XOR "in2";
```

Таблица 18

Таблицы истинности логических операторов: *a* – унарного, *б* – бинарных

<i>a</i>	in1	NOT	<i>б</i>	in1	in2	AND	OR	XOR
	0	1		0	0	0	0	0
	0	1		0	1	0	1	1
	1	0		1	0	0	1	1
	1	0		1	1	1	1	0

Оператор присваивания и операторы двоичной логики являются наиболее часто используемыми операторами и позволяют решать несложные задачи автоматизации на основе позиционных законов управления. Примером такой задачи является упомянутая выше задача управления водогрейным котлом.

### Таймер в ПЛК

Время всегда играет важную роль в системах управления. Вот несколько типичных примеров:

при включении электропривода движения кормораздатчика от бункера с кормом к кормушкам необходимо в течение 2 с подавать предупреждающую световую и звуковую сигнализацию;

в процессе запаривания картофеля при достижении температуры в чане 120 °С необходимо выдержать интервал времени 20 мин. И только после этого отключать подачу пара и начинать выгрузку готовой массы картофеля.

Поэтому ПЛК должен иметь в своем составе таймеры как часть языка его программирования. Как показывает опыт, таймеры являются практически незаменимыми и одними из наиболее часто используемых инструкций при программировании ПЛК. С помощью таймерных команд можно создавать программные запаздывания.

В ПЛК Simatic S7-1200 представлены в распоряжение программиста следующие программные блоки, реализующие функции таймеров:

**TP (Generate pulse)** – импульсный таймер – генерирует однократный импульс заданной длительности. Когда на дискретном входе IN имеет место положительный фронт импульса (значение изменяется с FALSE в TRUE), значение на выходе Q устанавливается равным TRUE, и начинается отсчет интервала времени,

указанного на входе PT. В течение всего указанного интервала времени значение на выходе Q сохраняется равным TRUE (независимо от возможных изменений сигнала на входе IN), а по окончании интервала времени устанавливается в FALSE. При этом, значение времени, прошедшего с момента начала отсчета, сохраняется на выходе ET (elapsed time – прошедшее время).

**TON (Generate on-delay)** – задержка включения на заданное время. Когда на дискретном входе IN имеет место положительный фронт импульса (значение изменяется с FALSE в TRUE), начинается отсчет указанного интервала времени, по прошествии которого значение на выходе Q устанавливается в TRUE. После установления выхода Q = TRUE это значение сохраняется в течении всего времени, пока значение на входе IN=TRUE. Как только IN=FALSE, значение на выходе Q сразу же сбрасывается в FALSE.

**TOF (Generate off-delay)** – задержка выключения на заданное время. Когда значение IN=TRUE, значение на выходе также сразу устанавливается Q=TRUE. Когда значение на входе IN изменяется с TRUE на FALSE, начинается отсчет указанного интервала времени, по прошествии которого значение на выходе Q сбрасывается в FALSE.

**TONR (Timer accumulator)** – запоминающий таймер с запаздыванием включения. Выход запоминающего таймера с запаздыванием включения устанавливается в состояние TRUE по истечении заранее заданного времени. Истекшее время накапливается в переменной на выходе ET все время, пока вход IN=TRUE. Если на вход IN подать FALSE, накопление прекратится, а при подаче TRUE на IN – возобновится. Когда накопленное значение времени достигнет требуемого интервала PT, значение на выходе Q установится равным TRUE. Подача сигнала TRUE на вход R (reset) сбрасывает накопленное значение времени ET в 0, а значение на выходе Q – в FALSE независимо от сигнала на входе IN.

Важнейшим параметром для всех перечисленных блоков таймеров является длительность задаваемого интервала времени PT (preset time), которую часто называют уставкой. Значение уставки PT, а также значение истекшего времени ET (elapsed time) выражаются в миллисекундах и хранятся в памяти ПЛК в виде двойного целого числа со знаком. Такой тип данных имеет название TIME. Значение типа данных TIME использует идентификатор T#

и может быть введено как простая единица времени, например «T#200ms», или в виде комбинированных единиц времени, например «T#5s\_200ms».

**RESET\_TIMER** сбрасывает указанный таймер программно в исходное состояние.

**PRESET\_TIMER** устанавливает заданное значение временной уставки для указанного таймера.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХПОЗИЦИОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ И СИСТЕМ

**Цель работы:** ознакомление с принципом действия двухпозиционного регулятора; исследование двухпозиционного регулятора на примере регулятора температуры и режимов работы двухпозиционных систем на примере САР температуры сушильной камеры.

### Задание:

1. Запрограммировать измеритель-регулятор температуры МТ2141 как двухпозиционный регулятор температуры сушильной камеры. Заданную температуру  $\theta_{\text{зад}}$  и ширину зоны неоднозначности  $2a$  задает преподаватель.
2. Снять статическую характеристику регулятора как функцию сопротивления датчика. По снятой характеристике рассчитать, действительно ли регулятор срабатывает при заданных температурах.
3. В программе компьютерного моделирования Simulink составить компьютерную модель двухпозиционной САР температуры в сушильной камере и смоделировать ее работу.

### Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Лабораторная установка выполнена на базе цифрового измерителя-регулятора МТ2141, предназначенного для измерения и регулирования температуры (рис. 60), магазина сопротивлений, имитирующего датчик температуры – термометр сопротивления.



Рис. 60. Внешняя панель измерителя-регулятора температуры МТ2141

Регулятор позволяет реализовать двух- и трехпозиционные законы регулирования и ПИД-закон регулирования в нелинейной приближенной реализации. Для этого регулятор снабжен двумя программируемыми каналами регулирования с релейными выходами K1, K2.

К регулятору в качестве датчика могут быть подключены платиновые и медные термометры сопротивления 100П и 100М с номинальным сопротивлением при 0 °С равным 100 Ом, термопары, токовые и потенциальные датчики.

Для моделирования режимов работы позиционных САУ на ЭВМ используется пакет компьютерного моделирования Simulink, входящий в состав системы компьютерных расчетов MATLAB.

### Порядок выполнения работы

#### I. Программирование измерителя-регулятора температуры MT2141 на двухпозиционный регулятор температуры сушильной камеры

Работа прибора определяется значениями параметров, которые программируются оператором.

У прибора имеется три уровня программирования: конфигурационный, параметрический и рабочий. Переход от одного уровня ко второму осуществляется при нажатом состоянии операторной кнопки .

1.1. Для задания параметров на конфигурационном уровне программирования Conf необходимо на панели регулятора нажать кнопку  и удерживать ее до тех пор, пока на индикаторе прибора не появится сообщение Conf.

Программируемые параметры появляются последовательно при нажатии операторной кнопки .

На данном уровне необходимо задать положение Pnt – x1. Выбор разряда производится нажатием кнопки .

Выбранные значения подтверждаются одновременным нажатием операторных кнопок  + , причем первой нажимается кнопка .

Выход из данного уровня программирования осуществляется одновременным нажатием кнопок  + .

1.2. Для задания параметров на параметрическом уровне программирования Par необходимо на панели регулятора нажать кнопку  и удерживать ее до тех пор, пока на индикаторе прибора не появится сообщение Par.

Программируемые параметры появляются последовательно при нажатии операторной кнопки .

На данном уровне программирования задаем значения ширины зоны неоднозначности 2a для выхода K1 (HYS1). Для этого нажимаем операторную кнопку , пока на индикаторе прибора не появится сообщение HYS1, затем выбор численного значения ширины зоны неоднозначности производится нажатием операторной кнопки . Выбранное значение подтверждается одновременным нажатием операторных кнопок  + , причем первой нажимается кнопка .

Далее выбираем направление регулирования. Для этого нажимаем операторную кнопку , пока на индикаторе не появится сообщение dir. С помощью операторной кнопки  выбираем направление регулирования (нагрев) и выбор подтверждаем одновременным нажатием операторных кнопок  + , причем первой нажимается кнопка .

Выход из данного уровня программирования осуществляется одновременным нажатием кнопок  + .

1.3. На рабочем уровне задаем значение температуры  $\theta_{зад}$  (центр ширины зоны неоднозначности 2a).

Для этого нажимаем операторную кнопку  и, не отпуская ее, нажимаем операторную кнопку , с помощью операторной кнопки  выбираем заданное значение и затем фиксируем одновременным нажатием операторных кнопок  + .

Аналогичным образом задается центр неоднозначности для выхода K2. Разница заключается в том, что вместо кнопки  нажимается кнопка .

Следует иметь в виду, что центр срабатывания реле K2 должен отстоять достаточно далеко от центра срабатывания реле K1, чтобы реле K2 не срабатывало при работе заданной двухпозиционной системы.

## II. Снятие статической характеристики регулятора

В данной работе регулятор запрограммирован на термометр сопротивления 100M ( $W_{100} = 1,426$ ). Это значит, что датчик при температуре 0 °C имеет номинальное сопротивление 100 Ом, а при температуре 100 °C – сопротивление 142,6 Ом, поэтому номинальная статическая характеристика датчика описывается формулой

$$R_d = 100 + 0,426\theta, \quad (93)$$

где  $R_d$  – сопротивление датчика, Ом;  
 $\theta$  – температура, °C.

2.1. С помощью магазина сопротивлений увеличивать значение сопротивления датчика через 0,1 Ом и зафиксировать значение сопротивления  $R_d$  и  $\theta$ , при которых происходит включение реле K1. Затем уменьшать значение сопротивления магазина через 0,1 Ом и зафиксировать значение сопротивления  $R_d$  и  $\theta$ , при которых происходит выключение реле K1. Результаты внести в табл. 19.

Таблица 19

Статическая характеристика двухпозиционного регулятора

$R_d$ , Ом	100	100,1	100,2	...	115	...
$\theta$ , °C	0			...		...
$\theta_{расч}$ , °C						
Состояние реле K1						

2.2. Построить по данным табл. 19 статическую характеристику как функцию сопротивления датчика для регулирующего выхода K1, на ней показать ширину зоны неоднозначности.

2.3. Рассчитать по экспериментальной характеристике, при каких температурах срабатывает регулятор, используя статическую характеристику датчика (89). Сравнить полученные значения с запрограммированными параметрами порогов срабатывания ( $\theta_{зад}, \pm a$ ).

2.4. Сделать выводы о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.

## III. Компьютерное моделирование работы САР

Для компьютерного моделирования работы двухпозиционной САР за основу возьмем структурную схему САР температуры в сушильной камере, изображенную на рис. 23 (см. лабораторную работу № 5).

В качестве регулятора используется двухпозиционное реле, математическое описание работы которого, в соответствии с рис. 33, 35, имеет следующий вид:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } e \geq a; \\ 0, & \text{при } e \leq -a; \\ 1, & \text{при } -a < e < a \text{ и } \frac{de}{dt} < 0; \\ 0, & \text{при } -a < e < a \text{ и } \frac{de}{dt} > 0. \end{cases} \quad (94)$$

Для упрощения схемы будем считать, что значение коэффициента передачи датчика  $K_d$  учтено в релейной характеристике регулирующего блока, т. е., что регулятор «настроен» на подключение данного конкретного датчика температуры, как это действительно имело место в случае регулятора МТ2141 в пунктах I и II данной лабораторной работы. Будем полагать, что  $K_d = K_{зад} = 1$ . Отсюда следует, что величина выходного сигнала датчика и задатчика – температура, выраженная в градусах по Цельсию.

Таким образом, структурная схема рассматриваемой САР принимает вид, показанный на рис. 61.

Числовые значения параметров схемы ( $K_{ОУ}, T_1, T_2, T_d, K_{иу}, a, \theta_{зад}, \theta_H$ ) задаются преподавателем.

Выполнить запуск пакета компьютерного моделирования Simulink так, как это указано при описании выполнения лабораторной работы № 2.

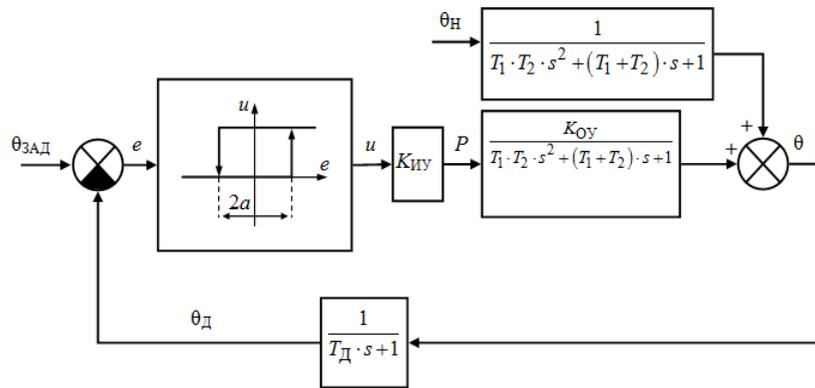


Рис. 61. Структурная схема двухпозиционной САР температуры в сушильной камере:  $\theta$  – управляемая величина (температура в камере);  $\theta_{\text{зад}}$  – заданное значение температуры в камере;  $\theta_{\text{д}}$  – значение температуры, показываемое датчиком;  $e$  – ошибка управления;  $u$  – сигнал управления;  $a$  – значение полуширины зоны неоднозначности;  $U$  – управляющее воздействие на объект со стороны исполнительного устройства (мощность нагревателя);  $\theta_{\text{н}}$  – возмущающее воздействие на объект (изменение наружной температуры)

В окне ввода команд Command Window в строке ввода ввести следующие команды:

```
>> clear all; close all; clc;
>> global T_ext % наружная температура в градусах Цельсия
>> global T_req % заданная температура в градусах Цельсия
>> global a % полуширина зоны неоднозначности регулятора
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта
>> global T_sens % параметры датчика
>> global K_iu % коэффициент исполнительного устройства
>> T_ext = ; T_req = ;
>> a =;
>> T1 = ; T2 = ;
>> K_obj = ;
>> T_sens = ;
>> K_iu = 50; % мощность нагревателя в ваттах
```

После знаков равенства нужно ввести заданные значения параметров.

Далее на основе структурной схемы САР на рис. 60 создать в Simulink модель САР с двухпозиционным регулятором. В качестве начальной основы можно взять модель САР, созданную при выполнении лабораторной работы № 5. В данную модель необходимо внести следующие изменения:

1. Удалить компонент П-регулятор.

2. Вместо удаленного компонента в качестве регулятора используется компонент Relay, находящийся в окне Simulink Library Browser в библиотеке компонентов Simulink на вкладке Discontinuities (компоненты с прерывными статическими характеристиками). Перетащить значок Relay в окно редактирования модели и расположить на месте удаленного компонента. Вход Relay (сигнал ошибки  $e$ ) соединить с выходом сравнивающего устройства, выход Relay (сигнал управления  $u$ ) соединим со входом исполнительного устройства. Двойным щелчком левой клавиши мыши на значке Relay открыть окно задания параметров данного блока Block Parameters: Relay. В нем в поле Switch on point (точка включения) ввести полуширину зоны неоднозначности  $a$ , в поле Switch off point (точка отключения) ввести  $-a$ . В полях Output when on (значение на выходе во включенном состоянии) и Output when off (значение на выходе в отключенном состоянии) оставить заданные по умолчанию значения: 1 и 0, соответственно. Ввод данных подтвердить нажатием кнопок Apply и OK.

3. Двойным щелчком левой клавиши мыши на элементе Датчик открыть окно задания его параметров Block parameters: Датчик и в поле Numerator (числитель передаточной функции) вместо  $K_{\text{sens}}$  ввести 1, ввод подтвердить нажатием клавиш Apply и OK.

4. Удалить компонент Задатчик.

5. В качестве нулевого начального условия можно считать, что до начала процесса моделирования, т. е. при  $t < 0$ , САР была выключена, и в момент включения САР (при  $t = 0$ ), температура внутри сушильной камеры была равна температуре снаружи:  $\theta_0 = \theta_{\text{н}}$ .

Для задания указанного нулевого начального условия используется компонент Sum (библиотека компонентов Simulink, вкладка Math Operations) и два компонента Constant (источник постоянного

по времени сигнала, расположен на вкладке **Sources** библиотеки **Simulink**).

Компонент **Sum** (выполняет суммирование либо вычитание сигналов) перетащить мышью в окно редактирования модели и расположить слева от значка устройства сравнения (см. рис. 61). Нажать правой кнопкой мыши на элементе суммирования и выбрать во всплывающем меню пункт **Format** → **Show name** (по умолчанию данному элементу присвоено имя **Sum1**). Двойным щелчком левой кнопки мыши на элементе **Sum1** открыть окно задания его параметров и в нем в поле **List of signs** вместо **|++** ввести **|+-**, после чего подтвердить ввод нажатием кнопок **Apply** и **OK**.

Два компонента **Constant** поочередно перетащить мышью в окно редактирования модели и расположить слева от значка **Sum1**. Первому из элементов автоматически будет присвоено имя **Constant**, второму – **Constant1**.

Выход элемента **Constant** соединить со входом «плюс» элемента **Sum1**. На получившейся линии соединения щелкнуть правой клавишей мыши и во всплывающем меню выбрать команду **Signal Properties** (свойства сигнала). В открывшемся в результате этого диалоговом окне в поле **Signal name** (имя сигнала) ввести **T\_req** (от англ. «required» – требуемый), после чего нажать **Apply** и **OK**. Элемент **Constant**, таким образом, служит для ввода в систему заданного значения температуры в сушильной камере. Двойным щелчком левой клавиши мыши на элементе **Constant** открыть диалоговое окно задания его параметров **Block parameters: Constant** и в поле **Constant value** (значение постоянного сигнала) ввести имя глобальной переменной **T\_req**, после чего ввод подтвердить нажатием **Apply** и **OK**.

Элемент **Constant1** будет служить для ввода в систему значения наружной температуры. Поэтому выход элемента **Constant1** следует соединить со входом «минус» элемента **Sum1**, на получившейся линии соединения задать имя сигнала **T\_ext** (от англ. «exterior» – наружный). В качестве значения постоянного сигнала элемента **Constant1** задать имя соответствующей глобальной переменной **T\_ext**.

Таким образом, на задающий вход системы (т. е. на вход «плюс» сравнивающего элемента **Sum**) будет подаваться сигнал разности между заданным значением температуры и наружной температурой:

$\theta_{\text{зад}} - \theta_{\text{н}}$ . Другими словами, в нашем случае задающее воздействие на систему – это то, насколько температура внутри сушильной камеры должна быть выше наружной температуры.

6. В процессе моделирования работы САР необходимо отображать графики изменения во времени следующих величин: сигнала ошибки регулирования  $e(t)$ , сигнала управления  $u(t)$  на выходе регулятора и температуры внутри сушильной камеры  $\theta(t)$ . Для отображения графиков используется компонент **Scope**, находящийся на вкладке **Sinks** в библиотеке **Simulink**. Перетащить его в окно редактирования модели и расположить так, как показано на рис. 62.

Двойным щелчком левой клавиши мыши на элементе **Scope** открыть его рабочее окно. Первоначально в рабочем окне **Scope** имеется координатное поле для отображения только одного графика. Для отображения трех графиков сигналов в верхней части окна на панели инструментов выполнить левой кнопкой мыши щелчок

на кнопке **Parameters**  (второй слева), в появившемся всплывающем окне задания параметров в поле **Number of axes** ввести число 3, ввод данных подтвердить нажатием **Apply** и **OK**. После этого в окне редактирования модели (компонент **Scope** уже имеет 3 входа) верхний вход **Scope** соединить с линией сигнала **e** между выходом элемента сравнения **Sum** и входом регулятора **Relay**. Второй вход **Scope** соединить с линией сигнала **u** между выходом регулятора **Relay** и входом исполнительного устройства.

Так как сигнал  $y$  на выходе объекта управления – это изменение температуры в сушильной камере относительно значения наружной температуры, т. е. разность  $y(t) = \theta(t) - \theta_{\text{н}}$ , то для отображения на графике абсолютного значения температуры в камере (в градусах Цельсия) необходимо выполнить суммирование:  $\theta(t) = y(t) + \theta_{\text{н}}$ . Для этого используется еще один элемент суммирования **Sum**. При перетаскивании в окно редактирования модели ему будет автоматически присвоено имя **Sum2**. Один из входов элемента **Sum2** соединить с линией сигнала **T\_ext**, а другой вход – с выходом объекта управления **OY**, т. е. с линией сигнала  $y$ . Выход элемента **Sum2** соединить с третьим входом элемента **Scope**.

Приблизительный вид созданной графической модели исследуемой САР температуры в животноводческом помещении показан на рис. 62.

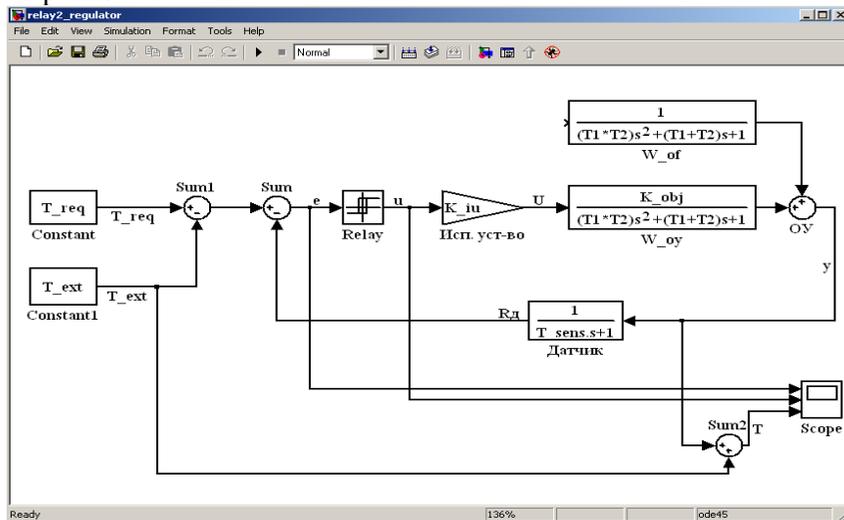


Рис. 62. Графическая модель САР с двухпозиционным регулятором

Сохранить построенную графическую модель САР в файл с именем «relay2\_regulator.mdl».

Для запуска процесса моделирования выполнить команду меню **Simulation** → **Start**. Открыв затем рабочее окно элемента **Scope**, можно видеть соответствующие графики изменения во времени сигналов  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $\theta(t)$ . Для обеспечения наглядности отображения графиков можно развернуть рабочее окно **Scope** на весь экран,

а также нажать на панели инструментов кнопку **Autoscale** (автоматическое масштабирование).

Провести моделирование изменения возмущающего воздействия на систему в некоторый момент времени, полагая, что это изменение имеет форму ступенчатого воздействия, т. е. что в некоторый момент времени наружная температура достаточно быстро изменяется на несколько градусов. Для этого следует использовать компонент **Step** (ступенчатый сигнал), располагающийся на вкладке **Sources** библиотеки компонентов **Simulink**. Перетащить мы-

шью данный компонент в окно редактирования модели, выход его соединить со входом элемента **W\_of**, т. е. со входом возмущающего воздействия на систему. Двойным щелчком левой клавиши мыши на элементе **Step** открыть окно задания его параметров. В поле **Step time** (время ступенчатого изменения сигнала) ввести указанное преподавателем значение времени, в поле **Initial value** (начальное значение сигнала) оставить 0, а в поле **Final value** (конечное значение сигнала) ввести указанное преподавателем значение, на которое изменяется наружная температура. Ввод данных подтвердить нажатием кнопок **Apply** и **OK**.

Запустить заново процесс моделирования и оценить, как изменились соответствующие графики  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $\theta(t)$ .

Промоделировать работу САР с различными возмущающими воздействиями, указанными преподавателем. Графики поведения системы при двух различных возмущающих воздействиях  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $\theta(t)$  необходимо построить в отчете.

Сделать выводы о переходных и установившемся режимах работы двухпозиционных систем и изменении этих режимов при изменении возмущающего воздействия.

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Результаты эксперимента (табл. 19).
3. Статическая характеристика регулятора в виде функции сопротивления датчика.
4. Расчетные температуры срабатывания регулятора.
5. Выводы о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.
6. Компьютерная модель исследуемой САР, созданная в Simulink.
7. Графики  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $\theta(t)$  поведения системы при двух различных возмущающих воздействиях.
8. Выводы о переходных и установившемся режимах работы двухпозиционных систем и изменении этих режимов при изменении возмущающего воздействия.

### Контрольные вопросы

1. Дать определение позиционного закона регулирования, двухпозиционного закона регулирования.
2. Назвать параметры настройки двухпозиционных регуляторов.
3. Пояснить смысл понятия «зона неоднозначности».
4. В каком установившемся режиме работают двухпозиционные системы?
5. Назвать показатели качества регулирования двухпозиционных САР.
6. Как изменяются режимы работы двухпозиционных систем при изменении возмущающего воздействия?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХПОЗИЦИОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ И СИСТЕМ

**Цель работы:** ознакомление с принципом действия трехпозиционного регулятора; исследование трехпозиционного регулятора на примере регулятора температуры и режимов работы трехпозиционных систем на примере САР температуры сушильной камеры.

### **Задание:**

1. Запрограммировать измеритель-регулятор температуры МТ2141 на трехпозиционный регулятор температуры сушильной камеры. Заданную температуру  $\theta_{\text{зад}}$  и ширину зоны нечувствительности  $2a$  задает преподаватель.
2. Снять статическую характеристику регулятора как функцию сопротивления датчика. По снятой характеристике рассчитать, действительно ли регулятор срабатывает при заданных температурах.
3. В программе компьютерного моделирования Simulink составить компьютерную модель трехпозиционной САР температуры в сушильной камере и смоделировать ее работу.

### **Аппаратура, используемая в лабораторной работе**

Цифровой измеритель-регулятор температуры МТ2141, предназначенный для измерения и регулирования температуры (рис. 60), магазин сопротивлений, имитирующий датчик температуры – термометр сопротивления, и ЭВМ для компьютерного моделирования режимов работы позиционных САУ с использованием пакета компьютерного моделирования Simulink, входящего в состав системы компьютерных расчетов MATLAB.

### **Порядок выполнения работы**

#### **I. Программирование измерителя-регулятора температуры МТ2141 на трехпозиционный регулятор сушильной камеры**

Трехпозиционный закон регулирования задается настройкой зон неоднозначности и их центров для реле К1 и К2. При этом ширина

зоны нечувствительности равна разности  $\theta_{\text{зад}}$  для реле K1 и K2 плюс ширина зоны неоднозначности (дифференциал) этих реле.

Работа прибора определяется значениями параметров, которые программируются оператором.

Выполнить программирование измерителя-регулятора температуры МТ2141 (см. порядок выполнения лабораторной работы № 8).

## II. Снятие статической характеристики регулятора

В данной лабораторной работе выбран и заранее запрограммирован датчик 100М ( $W_{100} = 1,426$ ). Это значит, что датчик при температуре 0 °С имеет номинальное сопротивление 100 Ом, а при температуре 100 °С – сопротивление 142,6 Ом, поэтому номинальная статическая характеристика датчика описывается формулой (89).

2.1. С помощью магазина сопротивлений увеличивать значение сопротивления датчика через 0,1 Ом и зафиксировать значения  $R_1, R_2, \theta_1, \theta_2$ , при которых происходит включение реле K1 и K2. Затем уменьшать сопротивление магазина через 0,1 Ом и зафиксировать значения  $R_1, R_2, \theta_1, \theta_2$ , при которых происходит отключение реле K1 и K2. Результаты внести в табл. 20.

2.2. Построить статическую характеристику как функцию сопротивления датчика для регулирующих выходов K1 и K2, на ней показать ширину зон нечувствительности и неоднозначности (дифференциалы  $d$ ).

Таблица 20

Статическая характеристика трехпозиционного регулятора

$R_{\text{д}}, \text{Ом}$	100	100,1	100,2	...	115	...
$\theta, \text{°С}$	0			...		...
$\theta_{\text{расч}}, \text{°С}$						
Состояние реле K1						
Состояние реле K2						

2.3. Рассчитать по экспериментальной характеристике, при каких температурах срабатывает регулятор, используя статическую

характеристику датчика. Сравнить полученные значения с запрограммированными параметрами порогов срабатывания.

2.4. Сделать выводы о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.

## III. Компьютерное моделирование работы САР

Для компьютерного моделирования работы трехпозиционной САР за основу следует взять структурную схему САР температуры в сушильной камере, изображенную на рис. 63. В качестве регулятора используется трехпозиционное реле.

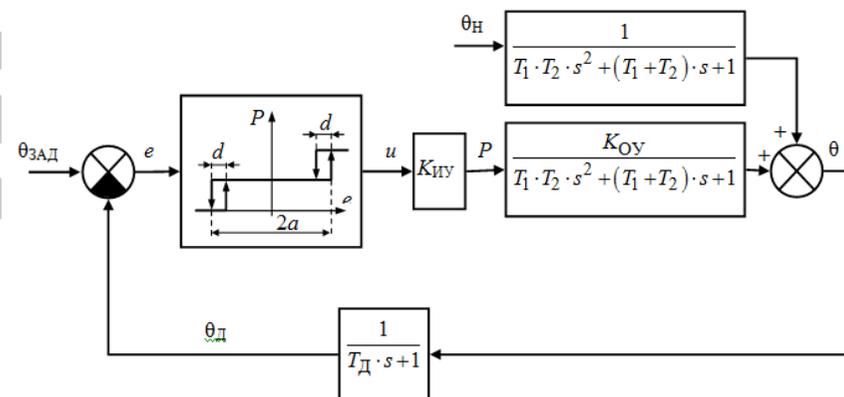


Рис. 63. Структурная схема трехпозиционной САР температуры в сушильной камере:  $\theta$  – управляемая величина (температура в камере);  $\theta_{\text{зад}}$  – заданное значение температуры в камере;  $\theta_{\text{д}}$  – значение температуры, показываемое датчиком;  $e$  – ошибка управления;  $u$  – сигнал управления;  $U$  – управляющее воздействие на объект со стороны исполнительного устройства (мощность нагревателя);  $\theta_{\text{H}}$  – возмущающее воздействие на объект (изменение наружной температуры)

Для упрощения схемы будем считать, что значение коэффициента передачи датчика  $K_{\text{д}}$  учтено в релейной характеристике регулирующего блока, т. е., что регулятор «настроен» на подключение данного конкретного датчика температуры, как это действительно имело место в случае регулятора МТ2141 в пунктах I и II данной лабораторной работы т. е., будем полагать, что  $K_{\text{д}} = K_{\text{зад}} = 1$ . Отсюда следует, что величина выходного сигнала датчика и задатчика – температура, выраженная в градусах по Цельсию.

Числовые значения параметров схемы ( $K_{Oy}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_d$ ,  $K_{iu}$ ,  $a$ ,  $d$ ,  $\theta_{зад}$ ,  $\theta_H$ ) задаются преподавателем.

Выполнить запуск пакета компьютерного моделирования Simulink так, как это указано при описании выполнения лабораторной работы № 2.

Ввести в MATLAB заданные преподавателем значения параметров схемы. Для этого в окне ввода команд Command Window в строке ввода ввести следующие команды:

```
>> clear all; close all; clc;
>> global T_ext % наружная температура в градусах Цельсия
>> global T_req % заданная температура в градусах Цельсия
>> global d % зона неоднозначности регулятора
>> global a % полуширина зоны нечувствительности регулятора
>> global T1 T2 K_obj % параметры объекта
>> global T_sens % постоянная времени датчика, с.
>> global K_iu % коэффициент исполнительного устройства
>> T_req = ; T_ext = ;
>> d = ; a = ;
>> T1 = ; T2 = ;
>> K_obj = ;
>> T_sens = ;
>> K_iu = 25; % мощность нагревателя в ваттах
```

После знаков равенства нужно ввести заданные значения параметров.

Далее на основе структурной схемы САР на рис. 63 создать в Simulink модель САР с трехпозиционным регулятором. В качестве начальной основы можно взять изображенную на рис. 62 модель САР, созданную при выполнении предыдущей лабораторной работы № 8. В данную модель необходимо внести следующие изменения:

1. Добавить еще один компонент типа **Relay**, находящийся в окне Simulink Library Browser в библиотеке компонентов Simulink на вкладке Discontinuities. При перетаскивании в окно редактирования модели новому компоненту будет автоматически присвоено имя **Relay1**.

2. Удалить линию связи между выходом первого реле **Relay** и входом исполнительного устройства. Между двумя этими значками

поместить еще один суммирующий элемент **Sum**, ему автоматически будет присвоено имя **Sum3**. Входы сумматора **Sum3** соединить с выходами реле **Relay** и **Relay1**, а выход сумматора – со входом исполнительного устройства, а также – со вторым входом элемента **Scope** (осциллографа).

Таким образом, в данной схеме трехпозиционный регулятор моделируется с помощью двух двухпозиционных реле: **Relay** и **Relay1**.

3. Задать параметры настройки трехпозиционного регулятора. Для этого двойным щелчком левой клавиши мыши на значке **Relay** открыть окно задания параметров данного блока **Block Parameters: Relay**. В нем, в поле **Switch on point** (точка включения) ввести  $-a + d$ , в поле **Switch off point** (точка отключения) ввести  $-a$ . В полях **Output when on** (значение на выходе во включенном состоянии) и **Output when off** (значение на выходе в отключенном состоянии) оставить заданные по умолчанию значения: 1 и 0, соответственно. Ввод данных подтвердить нажатием кнопок **Apply** и **OK**.

Аналогично для блока **Relay1** задать следующие параметры:  $a$  – для точки включения и  $a - d$  – для точки выключения.

Приблизительный вид созданной графической модели исследуемой САР температуры в животноводческом помещении показан на рис. 64.

Сохранить построенную графическую модель САР в файл с именем «**relay3\_regulator.mdl**».

Для запуска процесса моделирования выполнить команду меню **Simulation** → **Start**. Открыв затем рабочее окно элемента **Scope**, можно видеть соответствующие графики изменения во времени сигналов  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $\theta(t)$ . Для обеспечения наглядности отображения графиков можно развернуть рабочее окно **Scope** на весь экран,

а также нажать на панели инструментов кнопку **Autoscale**  (автоматическое масштабирование).

Для моделирования ступенчатого возмущающего воздействия на систему используется компонент **Step** (ступенчатый сигнал), располагающийся на вкладке **Sources** библиотеки компонентов Simulink. Перетащив мышью данный компонент в окно редактирования модели, выход его соединить со входом элемента **W\_of**, т. е. со входом возмущающего воздействия на систему. Двойным щелчком левой клавиши мыши на элементе **Step** открыть окно

задания его параметров. В поле **Step time** (время ступенчатого изменения сигнала) ввести указанное преподавателем значение времени, в поле **Initial value** (начальное значение сигнала) оставить 0, а в поле **Final value** (конечное значение сигнала) ввести указанное преподавателем значение, на которое изменяется наружная температура. Ввод данных подтвердить нажатием кнопок **Apply** и **OK**.

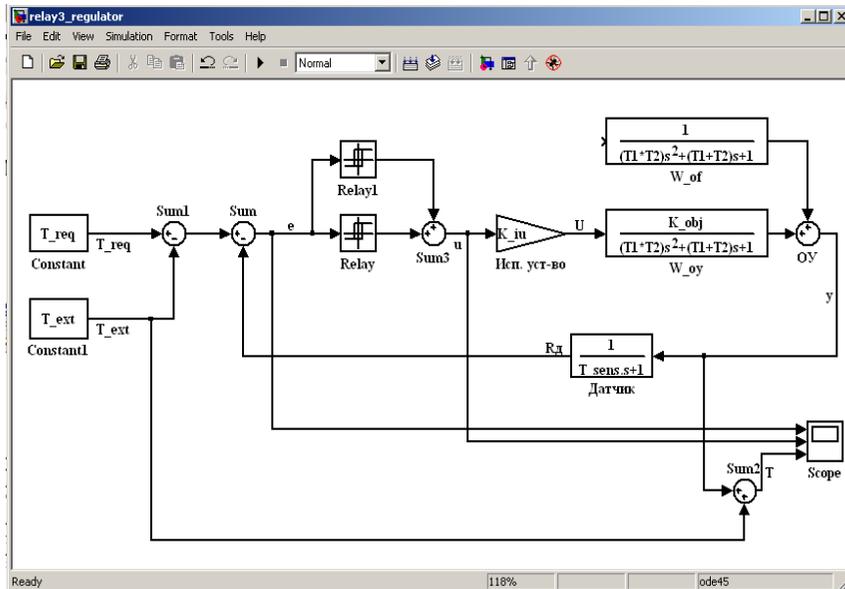


Рис. 64. Графическая модель САП с трехпозиционным регулятором

Запустить заново процесс моделирования и оценить, как изменились соответствующие графики  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $\theta(t)$ .

В работе необходимо промоделировать работу САП с различными возмущающими воздействиями, указанными преподавателем. Графики поведения системы при двух различных возмущающих воздействиях  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $\theta(t)$  необходимо построить в отчете.

Сделать выводы о переходных и установившемся режимах работы трехпозиционных систем и изменении этих режимов при изменении возмущающего воздействия.

## Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Результаты эксперимента (табл. 20).
3. Статическая характеристика регулятора в виде функции сопротивления датчика.
4. Расчетные температуры срабатывания регулятора.
5. Выводы о соответствии запрограммированных параметров расчетным значениям.
6. Компьютерная модель исследуемой САП, созданная в Simulink.
7. Графики  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $\theta(t)$  поведения системы при двух различных возмущающих воздействиях.
8. Выводы о переходных и установившемся режимах работы трехпозиционных систем и изменении этих режимов при изменении возмущающего воздействия.

## Контрольные вопросы

1. Дать определение трехпозиционного закона регулирования.
2. Назвать параметры настройки трехпозиционных регуляторов.
3. Пояснить разницу между понятиями зона нечувствительности и зона неоднозначности.
4. В каком установившемся режиме работают трехпозиционные системы?
5. Назвать показатели качества регулирования трехпозиционных САП.
6. Как изменяются режимы работы трехпозиционных систем при изменении возмущающего воздействия?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

**Цель работы:** изучить принцип действия, назначение, особенности работы и примеры исполнения потенциометрических датчиков, экспериментально исследовать потенциометрический датчик для измерения угловых перемещений.

### Задание:

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и приборами, необходимыми для исследования.
2. Исследовать влияние сопротивлений нагрузки на величину выходного напряжения однотактного потенциометрического измерительного преобразователя.
3. Исследовать влияние сопротивлений нагрузки на величину выходного напряжения потенциометрического преобразователя, включенного по мостовой схеме.
4. Построить статические характеристики потенциометрических измерительных преобразователей по экспериментальным данным.
5. Определить чувствительность и максимальную относительную погрешность потенциометрических измерительных преобразователей при различных нагрузках. Рассчитать максимальную относительную погрешность потенциометрических измерительных преобразователей при различных нагрузках.

### Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Учебный лабораторный стенд «НТЦ-09.12 Основы автоматики и вычислительной техники». Внешний вид стенда показан на рис. 65.

Конструктивно стенд состоит из корпуса, в который установлено электрооборудование, электронные платы, лицевая панель и столешница интегрированного рабочего стола.

На лицевой панели изображены электрические схемы объектов исследования. Все схемы, изображенные на панели, разбиты на группы в соответствии с тематикой проводимых работ.

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

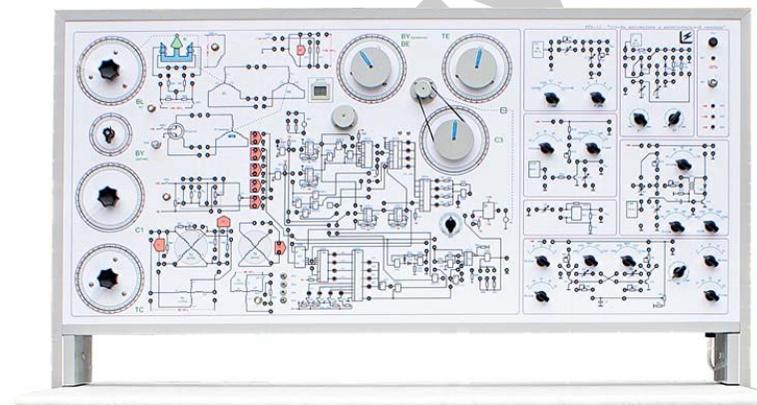


Рис. 65. Лабораторный стенд «НТЦ-09.12 Основы автоматики и вычислительной техники»

Для проведения работы необходимо собрать схему объекта исследования с помощью унифицированных перемычек, позволяющих собирать схемы без потери их наглядности.

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

### Порядок выполнения работы

1. До включения стенда с помощью тестера измерить полное (движок потенциометра в крайнем положении) сопротивление потенциометрического преобразователя  $C1$  и сопротивления нагрузок  $R_{H1}$  и  $R_{H2}$ . Снять зависимость  $r = f(\varphi)$  через каждые  $30^\circ$ .
2. Подготовить лабораторный стенд к работе:
  - собрать схему лабораторной установки согласно рис. 66;
  - подключить вольтметр к выходу потенциометрического преобразователя;
  - включить питание стенда SA1 и электрической схемы SA9.
3. Исследовать влияние сопротивлений нагрузки на величину выходного напряжения потенциометрического преобразователя. Снять статическую характеристику в режиме холостого хода. Для этого снять показания вольтметра через каждые  $30^\circ$  положений щетки потенциометра  $C1$  и полученные данные занести в табл. 21.

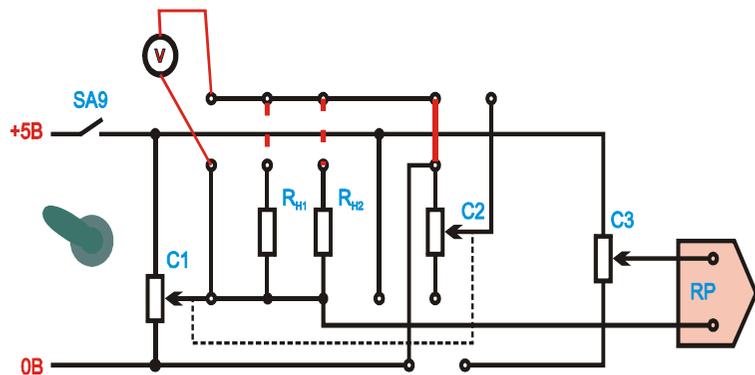


Рис. 66. Схема однотактного потенциметрического преобразователя

Таблица 21

Статическая характеристика потенциметрического преобразователя

$X_{ВХ}$ , град.	$U_{ВЫХ}$ , В		
	$R_H = \infty$	$R_{H1} = 510 \text{ Ом}$	$R_{H2} = 800 \text{ Ом}$
0°			
30°			
60°			
и т. д.			
...	...	...	...

Снять статическую характеристику потенциметрического преобразователя для различных нагрузок для этого поочередно подключить  $R_{H1}$  и  $R_{H2}$  и снять показания вольтметра через каждые 30° положения щетки потенциометра. Данные занести в табл. 21.

4. Исследовать влияние сопротивлений нагрузки на величину выходного напряжения потенциметрической мостовой схемы. Подготовить лабораторный стенд к работе:

- собрать схему согласно рис. 67;
- подключить вольтметр к выходу схемы;
- включить питание SA9;

установить ручку потенциометра в среднее положение, добившись по вольтметру  $U = 0 \text{ В}$ , и данное положение ручек считать за исходное.

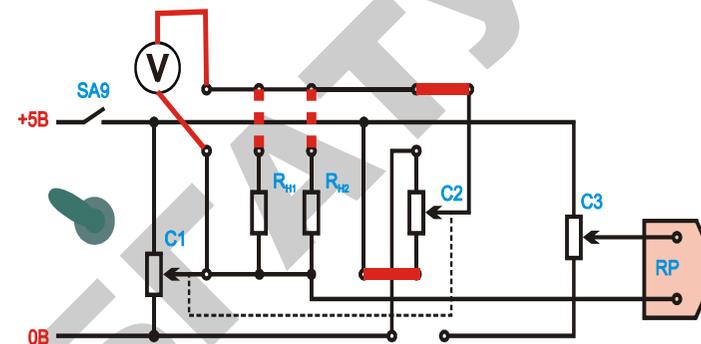


Рис. 67. Схема лабораторного стенда для исследования мостовой потенциметрической схемы

Снять статическую характеристику потенциметрической мостовой схемы в режиме холостого хода:

- одновременно поворачивая ручку потенциометра C1 вправо от исходного (сбалансированного) положения, задавая угловые положения через 30°, записать в табл. 22 показания вольтметра;
- одновременно поворачивая ручку потенциометра C1 влево от исходного положения, записать в табл. 22 показания вольтметра.

Снять статическую характеристику потенциметрической мостовой схемы при различных нагрузках:

- поочередно подключить к схеме  $R_{H1} = 510 \text{ Ом}$  и  $R_{H2} = 800 \text{ Ом}$ ;
- одновременно поворачивая ручки потенциометров вправо и влево от исходного положения, записать показания вольтметра в табл. 20.

Таблица 22

Статическая характеристика потенциметрической мостовой схемы

$X_{ВХ}$ , град.	$U_{ВЫХ}$ , В			
	$R_H = \infty$		$R_{H1} =$	$R_{H2} =$
	Правое вращение	Левое вращение		
0°				
30°				
60°				
и т. д.				
...				

5. Построить статические характеристики потенциметрического измерительного преобразователя.

По данным табл. 21 построить на одних координатных осях три характеристики.

По данным табл. 22 построить на одних координатных осях три характеристики.

Произвести анализ полученных статических характеристик.

6. Определить максимальную относительную погрешность потенциметрического преобразователя по формуле (88).

Определить экспериментальные максимальные относительные погрешности потенциметрических измерительных схем для различных нагрузок по формуле

$$E = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{х.х.}} - U_{\text{ВЫХ}}^{\text{R}_n}}{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{х.х.}}} \cdot 100 \% , \quad (95)$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{х.х.}}$  [В] – напряжение в режиме холостого хода;

$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{R}_n}$  [В] – напряжение при наличии нагрузки.

Сравнить расчетную и экспериментальную максимальные относительные погрешности.

7. Оформить отчет.

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Таблицы экспериментальных данных.
3. Графики статических характеристик.
4. Расчеты чувствительности и максимальной погрешности.
5. Выводы о влиянии сопротивлений нагрузки на величину выходного напряжения потенциметрического преобразователя.

### Контрольные вопросы

1. Описать назначение и конструкции потенциметрических измерительных преобразователей.

2. Пояснить принцип работы потенциметрических преобразователей.

3. Погрешности потенциметрических преобразователей.

4. Описать влияние нагрузки на линейность статической характеристики потенциметрических преобразователей.

5. Перечислить преимущества и недостатки потенциметрических преобразователей по сравнению с преобразователями других типов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНЫХ И ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ

**Цель работы:** исследование основных характеристик индуктивных и индукционных датчиков.

### Задание:

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и приборами необходимыми для исследования.
2. Исследовать влияние сопротивлений нагрузки на величину выходного напряжения индуктивного датчика.
3. Исследовать влияние сопротивлений нагрузки на величину выходного напряжения тахогенератора.
4. Построить статические характеристики индуктивного датчика по экспериментальным данным.
5. Построить статические характеристики тахогенератора по экспериментальным данным.

### Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Учебный лабораторный стенд «НТЦ-09.12 Основы автоматики и вычислительной техники». Внешний вид стенда показан на рис. 65.  
Дополнительное оборудование: осциллограф, тестер.

### Порядок выполнения работы

1. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на величину выходного напряжения индуктивного датчика.
  - 1.1. Подготовить лабораторный стенд к работе:
    - собрать схему (рис. 68). Установить предел измерения мультиметра 110 В;
    - тестером измерить сопротивления R56, R57;
    - включить SA1, SA7.
  - 1.2. Снять статическую характеристику индуктивного датчика при различных нагрузках:
    - плавно вращая диск BL вправо и влево от 0 определить диапазон угла поворота, при котором  $U_{\text{ВЫХ}}$  нарастает от 0 до  $U_{\text{МАКС}}$ ;

- выбрать в полученном диапазоне 5–6 точек угла  $\alpha$  и плавно вращая диск BL снять зависимость  $U_{\text{ВЫХ}} = f(\alpha)$  в режиме холостого хода;
- результаты занести в табл. 23;
- выключить SA1, SA7;
- выполнить п. 1.2 для сопротивлений нагрузки R56, R57, результаты занести в табл. 23.

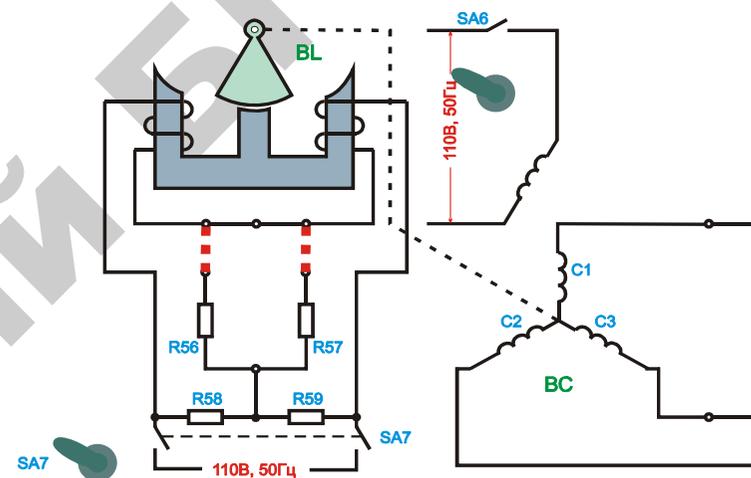


Рис. 68. Схема подключения индукционного датчика

Таблица 23

Статическая характеристика индуктивного датчика

$\alpha$ град.	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$		
	$R_{\text{H}} = \infty$	$R_{56} =$	$R_{57} =$
0	$U_0 = 0$	$U_0 = 0$	$U_0 = 0$
	$U_{\text{МАКС}} =$	$U_{\text{МАКС}} =$	$U_{\text{МАКС}} =$

Статическая характеристика тахогенератора

$\omega, \text{с}^{-1}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$		
	$R_{\text{Н}} = 0$	$R_{\text{Н1}} =$	$R_{\text{Н2}} =$
10			
20			
30			
40			
50			
60			

2.3. Построить статические характеристики тахогенератора в режиме холостого хода и для двух сопротивлений нагрузки.

3. Оформить отчет о проделанной работе.

#### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Таблицы экспериментальных данных.
3. Графики статических характеристик.
4. Выводы о влиянии сопротивлений нагрузки на величину выходного напряжения индуктивных и индукционных датчиков.

#### Контрольные вопросы

1. Пояснить принцип действия индуктивного датчика.
2. Пояснить принцип действия индукционного датчика.
3. Чем обусловлена нелинейность статической характеристики индуктивного датчика?
4. К каким классам относят индуктивные и индукционные датчики?
5. Какой тип питающего напряжения – постоянное либо переменное – и почему используют в индуктивных датчиках?
6. Для каких цепей в системах автоматики используются тахогенераторы?
7. Пояснить принцип действия асинхронного тахогенератора.
8. Описать отличия работы асинхронного тахогенератора от синхронного.
9. Описать работу тахогенератора постоянного тока.

1.3. Построить статические характеристики индуктивного преобразователя на основании данных табл. 23.

2. Исследовать влияние сопротивлений нагрузки на величину выходного напряжения тахогенератора.

2.1. Подготовить лабораторный стенд к работе:

▪ собрать схему рис. 69. Соединить пассиком вал двигателя М1 с валом тахогенератора BR;

▪ тестером измерить сопротивления нагрузки тахогенератора BR;

▪ включить SA1.

2.2. Снять статическую характеристику тахогенератора в режиме холостого хода и для двух сопротивлений нагрузки:

▪ изменяя резистором R70 частоту вращения  $\omega$  двигателя М1 снять зависимость  $U_{\text{ВЫХ ТГ}} = f(\omega)$  и результаты измерения занести в табл. 24. Угловая частота  $\omega$  измеряется импульсным датчиком. Результат измерения отражается на индикаторе «Частота вращения»;

▪ повторить для двух сопротивлений нагрузки тахогенератора;

▪ результаты занести в табл. 24;

▪ выключить SA1.

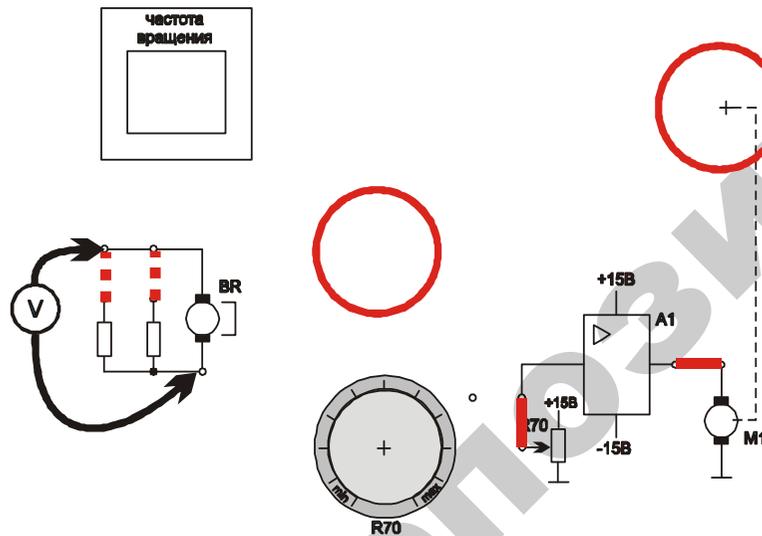


Рис. 69. Схема подключения тахогенератора

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ КОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ОСНОВ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ЯЗЫКА STRUCTURED CONTROL LANGUAGE

**Цель работы:** изучение структуры микропроцессорной системы управления и основ алгоритмического языка программирования контроллеров Structured Control Language (SCL) и приобретение навыков создания проекта автоматизации в среде программирования TIA Portal.

### Задание:

1. Разработать в среде TIA Portal первый простейший проект для ПЛК Simatic S7-1200.
2. Созданный проект откомпилировать, загрузить в ПЛК и исследовать его работу на лабораторном стенде.
3. Для ознакомления с основами алгоритмического языка программирования SCL разработать в среде TIA Portal проект для ПЛК Simatic S7-1200, реализующий решение задачи управления водогрейным котлом.
4. Созданную пользовательскую программу для решения задачи управления водогрейным котлом откомпилировать, загрузить в ПЛК и исследовать ее работу на лабораторном стенде.

### Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Лабораторная работа проводится на базе специализированного класса, включающего 6 рабочих мест (рис. 70).

На стенде реализована конфигурация, включающая в себя ПЛК Simatic S7-1200, компьютер с установленной на нем средой программирования и конфигурирования аппаратных средств, коммутационное оборудование с использованием сетевых интерфейсов Profibus и Industrial Ethernet, блоки ввода-вывода дискретных и аналоговых электрических сигналов для имитации технологического процесса. Также на стенде представлена сенсорная панель оператора KTP700 Basic Color PN – устройство ввода и отображения

информации. В качестве программатора используется ПЭВМ с лицензионной системой программирования TIA (Totally Integrated Automation) Portal (V13).



Рис. 70. Специализированный класс:  
а – общий вид учебного класса; б – ПЛК Simatic S7-1200

### Порядок выполнения работы

#### I. Постановка задачи управления лампой

Пусть имеется некоторая лампа, подключенная к цифровому выходу ПЛК DQa.0, и имеется кнопка «Start», подключенная к цифровому входу DIa.0.

Лампа может быть включена или выключена с помощью данной кнопки. При нажатии на кнопку «Start» лампа включается, а при отпускании – выключается.

#### II. Создание проекта для задачи управления лампой

Запуск интегрированной среды разработки TIA Portal V13 выполняется по соответствующему значку на рабочем столе компьютера либо из меню Пуск → Все программы → Siemens automation → TIA Portal V13. Изначально рабочее окно среды разработки TIA Portal находится в режиме порталного представления (рис. 56).

Для создания нового проекта необходимо выбрать левой кнопкой мыши действие Create new project (Создать новый проект),

после чего указать название проекта, задать каталог на диске, в котором будут храниться файлы проекта, и нажать на экране кнопку **Create**.

Следующий шаг – конфигурация используемого аппаратного оборудования: **Devices & Networks** → **Configure a device**. Необходимо добавить в проект (**Add new device**) контроллер Simatic S7-1200 модели CPU → 1214C DC/DC/DC с номером 6ES7 1214-1AG31-0XB0. При этом в поле **Device name** необходимо указать имя контроллера либо оставить автоматически предложенное имя (PLC\_1). Нажать на экране кнопку **Add**. В результате этого представление проекта автоматически изменится на проектно-ориентированное, в котором в рабочей области окна появится графическое изображение добавленного в проект контроллера. Щелкнув на нем правой кнопкой мыши и выбрав во всплывающем меню пункт **Properties** (Свойства), в нижней части экрана в окне инспектора свойств объекта можно просматривать и нужным образом настраивать свойства ЦПУ. В окне свойств можно установить следующие параметры:

- интерфейс PROFINET: установка IP-адреса для ЦПУ и синхронизации времени;
- DI, DO, и AI: настройка поведения встроенных цифровых и аналоговых входов и выходов;
- скоростные счетчики и генераторы импульсов: активизация и настройка быстрых счетчиков (HSC) и генераторов импульсов, используемых для операций с последовательностями импульсов (pulse-train operations, PTO) и широтно-импульсной модуляции (pulse-width modulation, PWM);
- запуск: настройка поведения ЦПУ после выключения и последующего включения;
- время суток: установка времени, часового пояса и переключения между летним и зимним временем;
- защита: установка защиты от чтения/записи и пароля для доступа к ЦПУ;
- системная и тактовая битовая память (тактовые маркеры): установка байта для функций «системной памяти» (для битов «первый цикл», «всегда включен» и «всегда выключен») и установка байта для функций «тактовой памяти» (где каждый бит включается и выключается с заранее заданной частотой);

- время цикла: установка максимального времени цикла или фиксированного минимального времени цикла;
- коммуникационная нагрузка: назначение процентной доли времени ЦПУ для коммуникационных задач.

Далее в дереве проекта (**Project tree**) для добавленного контроллера необходимо найти и открыть таблицу символьных имен переменных: выполнить **PLC\_1** → **PLC tags** → **Default tag table**, в которой следует определить символьные имена для следующих используемых в программе переменных (табл. 25).

Таблица 25  
Символьные имена используемых в проекте переменных

Name	Data Type	Logical Address	Comment
Start	Bool	%I0.0	Кнопка «Старт»
LampOn	Bool	%Q0.0	Цифровой выход управления лампой: FALSE – выключена, TRUE – включена

Далее необходимо добавить в проект кодовый блок, в котором будет введен текст программы. Для этого в дереве проекта (**Project tree**) нужно выбрать пункт **PLC\_1** → **Program blocks** → **Add new block**. В появившемся диалоговом окне (рис. 71) следует сначала указать тип добавляемого кодового блока – **Organization Block** и **Program cycle**. Такой блок в процессе работы программы будет выполняться в каждом цикле программы. Далее в поле **Language** следует выбрать язык программирования – **SCL**, и, наконец, в поле **Name** – задать название блока, например, **LampControl**, либо оставить название, автоматически предложенное системой. Нажать кнопку **OK**.

В появившемся на экране рабочем окне для ввода текста программы ввести следующий текст:

Текст программы на языке SCL  
LampOn =: Start;

При загрузке программы пользователя с устройства программирования в ЦПУ она сохраняется в постоянной памяти ЦПУ. Для загрузки проекта в ЦПУ необходимо в главном меню выбрать команду **Online** → **Download to device** (Загрузить в устройство).

Альтернативный способ: на панели инструментов щелкнуть на символе  (Загрузить в устройство). При этом в появившемся диалоговом окне (рис. 72) указать интерфейс связи между ЦПУ и компьютером (Type of the PG/PC interface) – PN/IE, и название сетевого интерфейса устройства программирования (PG/PC interface) – в нашем случае это название сетевой карты компьютера Realtek PCIe GBE Family Controller. После нажатия кнопки Start search (Начать поиск) компьютер выполняет поиск и установление связи с подключенным к нему оборудованием, соответствующим заданному в проекте (в нашем случае – только с одним ЦПУ PLC\_1). После установления такой связи и нажатия кнопки Load (Загрузить) выполняется загрузка программы пользователя в память ЦПУ и его запуск.

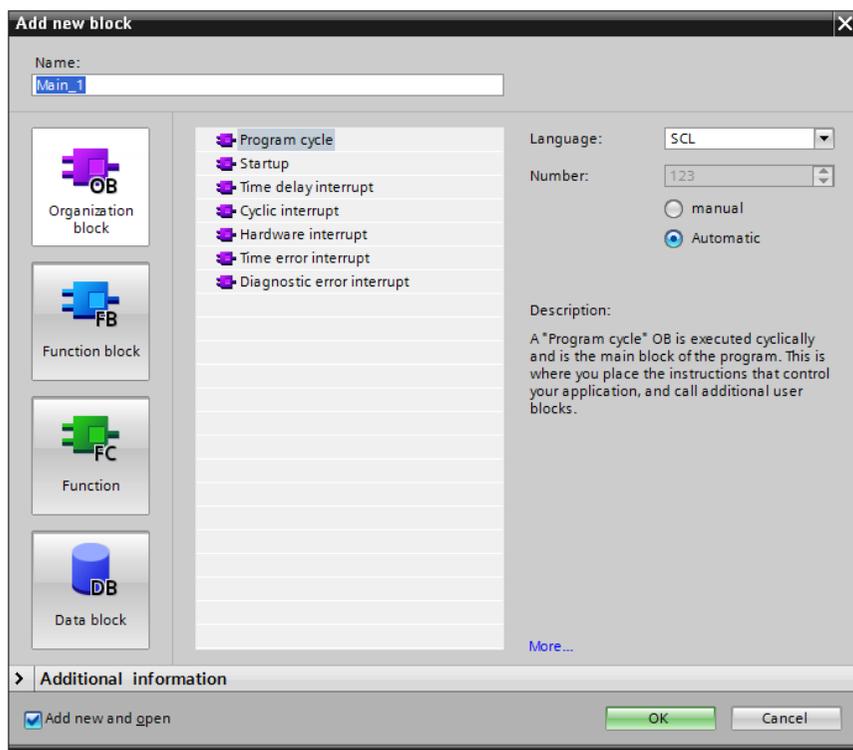


Рис. 71. Диалоговое окно добавления кодового блока в проект

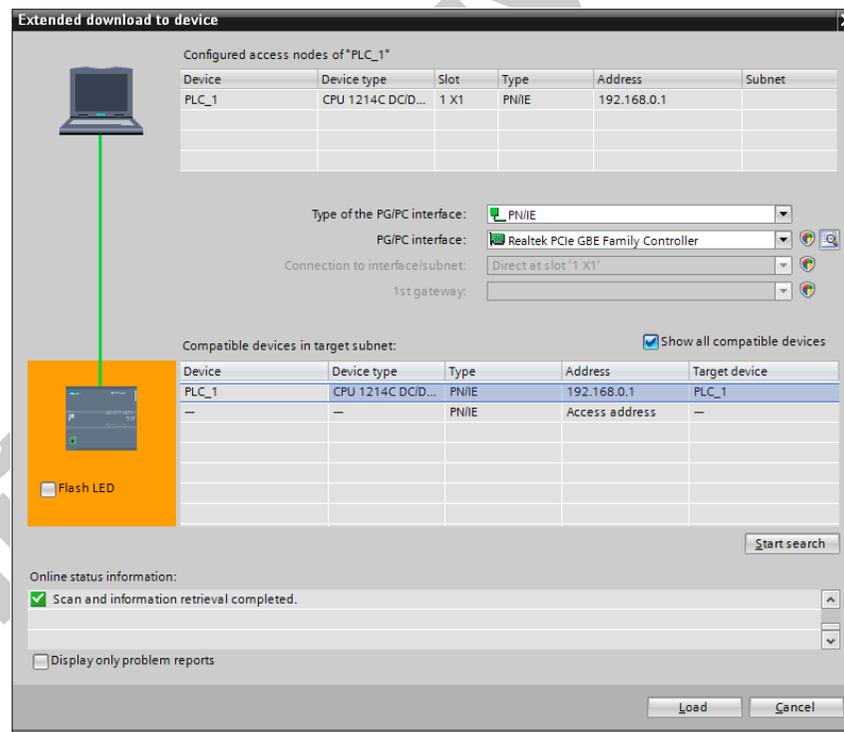


Рис. 72. Диалоговое окно загрузки программы пользователя в ЦПУ

### III. Постановка задачи управления водогрейным котлом

Имеется котел для подогрева воды (рис. 73).

Входы: I0.0 – датчик минимального уровня воды;

I0.1 – датчик максимального уровня воды;

I0.2 – минимальная температура;

I0.3 – максимальная температура.

Выходы: Q0.0 – входной клапан (наполнение);

Q0.1 – выходной клапан (слив);

Q0.2 – нагревательный элемент.

Необходимо циклически наполнять и опустошать резервуар, непрерывно регулируя температуру воды между максимальным и минимальным значениями.

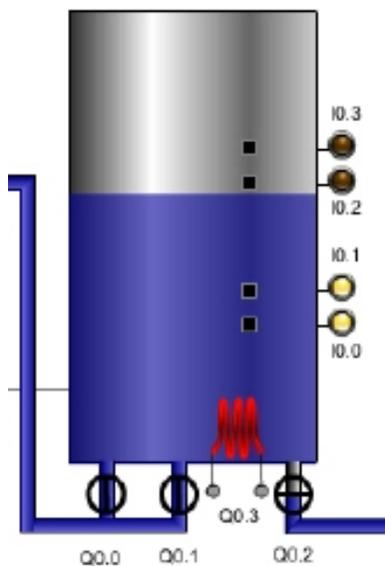


Рис. 73. Бак с водой как объект регулирования уровня воды и температуры

Клапан слива может быть открыт только при условии, когда температура воды находится в допустимых пределах. Клапан слива открывается (Q0.1 = TRUE), если уровень воды в баке превышает максимальный, и выключается (Q0.1 = FALSE), если уровень воды ниже минимального.

Клапан наполнения (Q0.0) включается, если уровень воды в баке ниже минимального, и выключается, если уровень воды выше максимального.

Нагрев воды (Q0.2) должен включаться, если уровень воды выше минимального уровня (I0.0) и температура воды ниже минимальной. Если температура воды достигла максимума, то нагрев воды должен прекратиться до снижения температуры до минимального значения.

#### IV. Создание проекта для задачи управления водогрейным котлом

Создать в среде разработки TIA Portal V13 новый проект и произвести конфигурацию используемого аппаратного оборудования.

Для определения символьных имен используемых в программе переменных выбрать в дереве проекта (Project tree) пункт PLC\_1 → PLC tags → Default tag table, открыть табл. 26 символьных имен переменных, в которой определить символьные имена для следующих переменных.

Таблица 26

Символьные имена используемых в проекте переменных

Name	Data Type	Logical Address	Comment
MinLevel	Bool	%I0.0	Датчик минимального уровня воды
MaxLevel	Bool	%I0.1	Датчик максимального уровня воды
MinTemperature	Bool	%I0.2	Датчик минимальной температуры
MaxTemperature	Bool	%I0.3	Датчик максимальной температуры
InFlowValve	Bool	%Q0.0	Входной клапан – наполнение
OutFlowValve	Bool	%Q0.1	Выходной клапан – слив
Heating	Bool	Q0.2	Нагревательный элемент

Далее необходимо добавить в проект кодовый блок **Water Level Control**, в котором будет введена подпрограмма управления уровнем воды в котле. Для этого в дереве проекта (Project tree) нужно выбрать пункт PLC\_1 → Program blocks → Add new block. В появившемся диалоговом окне (рис. 67) следует сначала указать тип добавляемого кодового блока – **Organization Block** и **Program cycle**. Такой блок в процессе работы программы будет выполняться в каждом цикле программы. Далее в поле **Language** следует выбрать язык программирования – **SCL**, и, наконец, в поле **Name** – задать название блока: **Water Level Control**. Нажать кнопку **OK**.

В появившемся на экране рабочем окне для ввода текста программы ввести следующий текст:

Код программы на языке SCL: организационный блок управления уровнем воды

```

IF "MaxLevel" THEN // если уровень воды выше макси-
мального,
  "OutFlowValve" := TRUE; // клапан слива включается
  "InFlowValve" := FALSE; // клапан наполнения выключается
END_IF;
IF NOT "MinLevel" THEN //если уровень воды ниже мини-
мального,
  "OutFlowValve" := FALSE; // клапан слива выключается
  "InFlowValve" := TRUE; // клапан наполнения включается
END_IF;
IF ("MaxTemperature" OR (NOT "MinTemperature")) THEN
// клапан слива выключается,
// если температура вне заданного интервала,
// т.е. выше максимальной ИЛИ ниже минимальной
"OutFlowValve" := FALSE;
END_IF;

```

Загрузить созданную программу в контроллер (см. пункт II) и исследовать ее работу на лабораторном стенде.

После этого необходимо добавить в проект кодовый блок **Temperature Control**, в котором будет введена подпрограмма управления температурой воды в котле. Текст подпрограммы управления температурой необходимо продумать и ввести самостоятельно, руководствуясь требованиями задачи и используя сведения об основных операторах языка SCL.

Загрузить созданную программу в контроллер, исследовать и продемонстрировать преподавателю ее работу на лабораторном стенде.

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Схемы подключения дискретного входа и дискретного выхода к контроллеру для задачи управления лампой.
3. Описание цикла выполнения программы пользователя задачи управления лампой в ПЛК.
4. Схемы подключения дискретных входов и выходов к контроллеру для задачи управления водогрейным котлом.
5. Текст разработанной программы управления водогрейным котлом.

### Контрольные вопросы

1. Раскрыть понятие «микропроцессорная система управления». Какие существуют синонимы данного понятия?
2. Дать определение понятия бит/байт. Какое максимальное число можно записать в 1 байт?
3. Дать определение: программное обеспечение. Что в него входит?
4. Дать определения: операционная система, мистема программирования, прикладная программа.
5. Описать создание проекта в системе программирования TIA (Totally Integrated Automation) Portal (V13).
6. На каких языках могут создаваться прикладные программы в системе программирования TIA Portal (V13)?
7. Что такое дискретный вход или выход? Как определяются их состояния?
8. Дать характеристику дискретным входам и выходам контроллера Simatic S7-1200.
9. Нарисовать схему подключения кнопки с замыкающим контактом к дискретному входу DIa.2.
10. Нарисовать схему подключения светодиода к дискретному выходу DQb.1.
11. Описать объявление переменных и присвоение символьных имен дискретным входам и выходам.
12. Пояснить принцип работы логических операторов NOT, AND, OR.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С РЕАЛИЗАЦИЕЙ СТАНДАРТНЫХ ФУНКЦИЙ ТАЙМЕРА

**Цель работы:** изучение функций таймера и принципов его использования в программах для ПЛК.

#### Задание:

Для закрепления сведений о стандартных таймерных блоках TP, TON, TOF и TONR, реализованных в ПЛК Simatic S7-1200, создать новую программу, в которой задействовать все указанные таймерные блоки, и исследовать ее работу на лабораторном стенде.

#### Аппаратура, используемая в лабораторной работе

Лабораторная работа проводится на базе специализированного класса (см. лабораторную работу № 12).

#### Порядок выполнения работы

Запустить интегрированную среду разработки TIA Portal V13, создать в ней новый проект и выполнить конфигурацию используемого аппаратного оборудования (см. порядок выполнения лабораторной работы № 12).

Для определения символьных имен используемых в программе переменных выбрать в дереве проекта (Project tree) пункт PLC\_1 → PLC tags → Default tag table, открыть таблицу символьных имен переменных, в которой определить символьные имена для следующих переменных (табл. 27).

Далее добавить в проект новый кодовый блок типа Organization Block, Program cycle – организационный блок циклического исполнения с вводом программы на языке SCL (см. порядок выполнения лабораторной работы № 12).

Так как таймерные блоки являются готовыми к использованию системными блоками, реализованными в пакете Simatic Step 7, то для их ввода в программу не следует набирать вручную соответствующий код, а нужно воспользоваться *одним из двух* вариантов:

- поместив курсор в рабочем окне ввода программы в нужное место, перейти на панель инструкций Instructions, открыть вкладку

Instructions → Basic instructions → Timer operations и дважды щелкнуть левой клавишей мыши на значке нужного блока;

- сначала перейти на панель инструкций Instructions, открыть вкладку Instructions → Basic instructions → Timer operations и перетащить мышью значок нужного блока в нужное место программы.

Таблица 27

Символьные имена используемых в проекте переменных

Name	Data Type	Logical Address	Comment
in0	Bool	%I0.0	Дискретный вход 0
in1	Bool	%I0.1	Дискретный вход 1
in2	Bool	%I0.2	Дискретный вход 2
in3	Bool	%I0.3	Дискретный вход 3
reset_in	Bool	%I0.4	Дискретный вход сброса таймера TONR
out0	Bool	%Q0.0	Дискретный выход 0
out1	Bool	%Q0.1	Дискретный выход 1
out2	Bool	%Q0.2	Дискретный выход 2
out3	Bool	%Q0.3	Дискретный выход 3
t0	Time	%MD0	Значение времени на выходе ET
t1	Time	%MD4	Значение времени на выходе ET
t2	Time	%MD8	Значение времени на выходе ET
t3	Time	%MD12	Значение времени на выходе ET

При этом среда Simatic Step 7 автоматически предложит создать новый системный блок данных, связанный с функциональным блоком таймера, и в появившемся диалоговом окне «Call options» предложит ввести название блока данных. В данном случае необходимо согласиться с предлагаемым по умолчанию вариантом или просто нажать ОК. В результате этого в рабочем окне ввода

программы появится кодовый блок таймера, имеющий примерно следующий вид:

```
"IEC_Timer_0_DB".TP(IN:=_bool_in_,
    PT:=_time_in_,
    Q=>_bool_out_,
    ET=>_time_out_);
```

В данный кодовый блок в скобках нужно ввести переменные, являющиеся входными и выходными параметрами. Так, справа от параметра «IN» помещена подсказка `_bool_in_`, что говорит о том, что данный параметр является входным параметром блока таймера и на его месте должна быть указана переменная типа `Bool`. В качестве параметра «PT» (Уставка) может быть указана как переменная типа `Time`, так и константа того же типа, например, `T#5s`. Для выходного параметра «Q» нужно указать выходную переменную типа `Bool`, а для выходного параметра «ET» – переменную типа `Time`, в которой будет автоматически сохраняться накопленное значение времени, т. е. время, прошедшее с момента подачи сигнала на вход блока таймера. Параметр «ET» можно не указывать, если в этом нет нужды.

Таким образом, в программу нужно добавить все четыре исследуемых таймерных блока и в качестве их входных и выходных параметров задать определенные в проекте переменные так, как это показано ниже.

Код программы исследования работы таймеров на языке SCL

```
//однократный импульс
"IEC_Timer_0_DB".TP(IN:="in0",
    PT:=T#3s,
    Q=>"out0",
    ET=>"t0");

//включение с запаздыванием
"IEC_Timer_0_DB_1".TON(IN:="in1",
    PT:=T#5s,
    Q=>"out1",
    ET=>"t1");
```

```
//выключение с запаздыванием
"IEC_Timer_0_DB_2".TOF(IN:="in2",
    PT:=T#2s,
    Q=>"out2",
    ET=>"t2");

//включение с запаздыванием с накоплением времени
"IEC_Timer_0_DB_3".TONR(IN:="in3",
    R:="reset_in",
    PT:=T#10s,
    Q=>"out3",
    ET=>"t3");
```

Загрузить программу в ПЛК и исследовать ее работу на стенде.

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы, цель, задание.
2. Схемы подключения дискретных входов и выходов к контроллеру.
3. Временные диаграммы изменения сигналов на входах и выходах исследуемых таймерных блоков.
4. Описание назначения входных и выходных параметров таймерных блоков.

### Контрольные вопросы

1. Описать цели использования таймерных блоков в программах ПЛК.
2. Какие таймерные блоки реализованы в ПЛК Simatic S7-1200?
3. Пояснить назначение входов и выходов блоков TP, TON, TOF.
3. Пояснить назначение входа R блока TONR.
4. Пояснить отличие блока TONR от блока TON.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компьютерные технологии и микропроцессорные средства в автоматическом управлении : учебное пособие по дисциплине «Автоматическое управление» / Карташов Б. А. [и др.] ; под ред. Б. А. Карташова. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2013. – 541 с.

2. Коновалов, Б. М. Теория автоматического управления : учебное пособие для студентов ВУЗов / Б. М. Коновалов, Ю. М. Лебедев // 3-е изд., доп. и перераб. – Санкт-Петербург : Лань, 2015. – 220 с.

3. Сидоренко, Ю. А. Теория автоматического управления : метод. указ. к лаб. раб. / Ю. А. Сидоренко, Е. Е. Мякинник. – Минск : БГАТУ, 2012. – 104 с.

4. Шишов, О. В. Технические средства автоматизации и управления (+ CD) : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по техническим направлениям / О. В. Шишов. – Москва : ИНФРА-М, 2012. – 397 с. : ил.

Учебное издание

**Сеньков** Андрей Григорьевич,  
**Матвейчук** Наталья Михайловна,  
**Мякинник** Елена Евгеньевна

АВТОМАТИКА.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *И. И. Гируцкий*  
Редактор *В. А. Гошко*  
Корректор *В. А. Гошко*  
Компьютерная верстка *В. А. Гошко*  
Дизайн обложки *Д. О. Бабакова*

Подписано в печать 21.11.2017 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 11,86. Уч.-изд. л. 9,27. Тираж 99 экз. Заказ 357.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.