

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой»



В. Е. Питолин

## АВТОМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Методические указания  
по выполнению лабораторных и практических работ  
для студентов специальностей  
6-05-0711-02, 6-05-0714-04, 9-09-0732-03, 9-09-0732-04  
очной и заочной форм обучения

*Текстовое электронное издание*

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой  
2025

1 – дополнительный титульный экран – сведения об издании

УДК 681.5(075.8)

Одобрено и рекомендовано к изданию методической комиссией  
факультета компьютерных наук и электроники  
(протокол № 5 от 23.12.2024)

Кафедра энергетики и электроники

Изложены теоретические сведения по тематике лабораторных и практических работ. Подробно рассматриваются методика выполнения работ, порядок настройки и эксплуатации лабораторного оборудования.

Конкретный перечень лабораторных и практических работ для отдельных специальностей выбирается из представленного практикума согласно утвержденным учебным программам по этим специальностям.

Для самоконтроля студентов в конце каждой работы предлагается перечень контрольных вопросов и индивидуальных заданий.

Настоящие методические указания предназначены для студентов специальностей 6-05-0711-02 «Переработка нефти и газа и промышленный органический синтез», 6-05-0714-04 «Технологические машины и оборудование», 9-09-0732-03 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна», 9-09-0732-04 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» очной и заочной форм обучения.

© Питолин В. Е., 2025

© Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой, 2025

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Автоматика и автоматизация технологических процессов» В. Е. Питолина использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

ПИТОЛИН Владимир Евгеньевич

## АВТОМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Методические указания  
по выполнению лабораторных и практических работ  
для студентов специальностей  
6-05-0711-02, 6-05-0714-04, 9-09-0732-03, 9-09-0732-04  
очной и заочной форм обучения

Редактор *Т. А. Дарьянова*

---

Подписано к использованию 03.09.2025.  
Объем издания 3,70 Мб. Заказ 339.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет  
имени Евфросинии Полоцкой».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 27.05.2004.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ.....	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ, ПОВЕРКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ «САПФИР-22ДД» .....	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ РАСХОДОМЕРОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ ТЕПЛОСЧЕТЧИКА.....	30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА .....	43
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА В ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ.....	52
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПО УРОВНЮ .....	58
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПО ДАВЛЕНИЮ .....	64
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8 ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПОДДЕРЖАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОТАПЛИВАЕМОМ ОБЪЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММИРУЕМОГО КОНТРОЛЛЕРА ALPHA-2 .....	71
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9 НАСТРОЙКА КОНТРОЛЛЕРА НА ПИД-ЗАКОН РЕГУЛИРОВАНИЯ .....	79
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ЗАДАНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ ДЛЯ СТУДЕНТОВ РАЗЛИЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ И ФОРМ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ».....	90
ЛИТЕРАТУРА.....	115

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по курсу «Автоматика и автоматизация технологических процессов» проводится в соответствии с учебными программами специальностей: 6-05-0711-02 «Переработка нефти и газа и промышленный органический синтез», 6-05-0714-04 «Технологические машины и оборудование», 9-09-0732-03 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна», 9-09-0732-04 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов».

На первом занятии студенты проходят вводный инструктаж по технике безопасности при выполнении лабораторных работ, о чем делается запись в журнале инструктажей по технике безопасности лаборатории.

К началу лабораторного занятия студент обязан ознакомиться с содержанием теоретической части и методикой выполнения предстоящей работы, законспектировать некоторые теоретические положения и оформить необходимые таблицы для регистрации результатов лабораторного эксперимента и последующей их обработки.

Особое внимание следует обратить на приборы и их принцип действия, уяснить смысл наблюдаемых физических явлений, которые положены в основу работы устройств автоматики.

Студент, не подготовившийся к занятию, к работе не допускается.

К началу лабораторных занятий студент должен сдать преподавателю отчет по предыдущей работе, если он не был сдан в день выполнения работы. Требования к отчетам указаны в методических рекомендациях к работам.

При защите отчетов студент должен отвечать на вопросы, приведенные в заключительном разделе методических указаний по соответствующей лабораторной работе.

Студент, не сдавший по неуважительной причине отчеты по двум предыдущим работам, к дальнейшему прохождению лабораторного практикума не допускается. Дальнейший допуск к лабораторному практикуму осуществляется по представлению деканата.

Студенты, имеющие задолженности по лабораторным работам, не допускаются к экзаменам по данной дисциплине в соответствии с «Правилами аттестации студентов ...».

# Лабораторная работа 1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ

### 1.1 Цель работы:

- 1 Изучение стенда для экспериментальных исследований устройств и систем автоматического регулирования.
- 2 Изучение потенциометрического датчика уровня и электромагнитного реле (назначение, устройство, характеристики).
- 3 Экспериментальное исследование характеристик устройств.

### 1.2 Краткие теоретические сведения

#### Потенциометрический датчик

Среди множества разнообразных элементов автоматики особое место занимают **первичные преобразователи, сенсоры** или **датчики**. **Первичным** это устройство называют потому, что датчик является первым из элементов в системах автоматического регулирования, получающим и перерабатывающим информацию о текущем состоянии объекта регулирования.

**Датчики** применяют для измерения параметров технологического процесса. Основная функция датчика – преобразование параметра процесса (регулируемой величины) в какой-либо сигнал – электрический, механический, гидравлический и др.

Датчик является составной частью регулятора. Иногда в системах автоматического регулирования используется не один, а несколько датчиков.

В настоящее время известны множество явлений, эффектов, видов преобразования свойств и энергии, которые используются в датчиках.

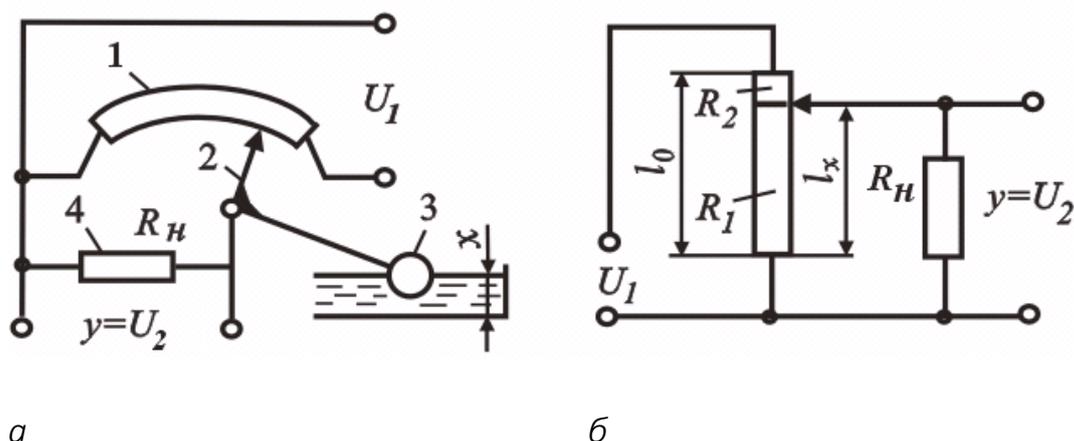
Основной характеристикой датчика является **статическая характеристика**, которая представляет собой зависимость между преобразуемой (входной) и преобразованной (выходной) величиной. Статическая характеристика датчика может представляться аналитическим выражением, графиком, таблицей.

В практике автоматизации технологических процессов достаточно распространенной является задача измерения линейных и угловых перемещений. Широкое применение при этом находят **потенциометрические**

(реостатные) датчики, которые предназначены для преобразования механического (линейного или углового) перемещения в электрическую величину в виде напряжения или тока.

**Потенциометрический датчик** представляет собой реостат, величина сопротивления которого изменяется при перемещении скользящего движка. Проводник реостата может представлять собой тонкую проволоку с высоким удельным сопротивлением, намотанную на диэлектрический каркас, а может быть выполнен нанесением гальваническим способом или плазменным напылением на диэлектрическую пластину металлографического состава.

На рисунке 1.1 приведены схемы потенциометрического датчика уровня поплавкового типа.



**а** – датчик уровня поплавкового типа;  
**б** – расчетная электрическая схема преобразователя датчика

**Рисунок 1.1.** – Схема потенциометрического датчика

Чувствительным элементом датчика является поплавок 3. В датчике можно выделить два преобразующих элемента. Первый преобразует изменение положения поплавка  $x$  в отклонение движка 2 потенциометра 1, включенного в электрическую цепь с напряжением питания  $U_1$ . При перемещении движка потенциометра изменяется напряжение  $U_2$  на резисторе нагрузки 4. Следовательно, второй преобразующий элемент датчика преобразует сигнал перемещения движка в выходной сигнал датчика – напряжение  $U_2$ . В результате датчик выдает унифицированный аналоговый электрический сигнал.

Схема электрического преобразователя поплавкового датчика показана на рисунке 1.1, б. Применяя законы Ома и Кирхгофа для соответствующих элементов электрической цепи, находим:

$$U_2 = U_1 \times \frac{R_1}{R_0} \times \frac{1}{1 + R_1 \times R_2 / (R_0 \times R_H)}, \quad (1.1)$$

где  $R_0$  – полное сопротивление потенциометра,  $R_0 = R_1 + R_2$ ;  
 $R_1, R_2$  – сопротивления плеч потенциометра, отделяемых его движком;  
 $R_H$  – сопротивление резистора нагрузки.

Если выбрать сопротивление нагрузки  $R_H$  гораздо больше полного сопротивления потенциометра  $R_0$ , то характеристика преобразователя будет практически линейной:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_1}{R_0} = U_1 \cdot \frac{l_x}{l_0}, \quad (1.2)$$

где  $l_x$  – длина плеча потенциометра, соответствующая измеряемой величине  $x$ ;

$l_0$  – длина потенциометра.

Можно подобрать плечи рычага, связывающего поплавок с движком потенциометра так, чтобы в требуемом диапазоне измерения уровня жидкости  $x$  связь между  $l_x$  и  $x$  будет линейной:  $l_x = k_1 \cdot x$ , где  $k_1$  – коэффициент передачи первого преобразующего элемента – двуплечего рычага. Статическая характеристика потенциометрического датчика уровня в этом случае будет линейной:

$$y = k \cdot x, \quad (1.3)$$

где  $y = U_2$ ;  $k = k_1 \cdot k_2$ , здесь  $k_2$  – коэффициент передачи второго преобразующего элемента – потенциометра.

Важной характеристикой датчика является **чувствительность**, которая представляет собой первую производную выходной величины (напряжения  $U_2$ ) по перемещению поплавка  $x$  (входной величине), т.е.

$$k_r = \frac{dy}{dx} = k_1 \cdot \frac{U_1}{l_0}. \quad (1.4)$$

Таким образом, чувствительность  $k_r$  можно рассматривать как коэффициент усиления датчика.

Рассмотренный потенциометрический датчик по принципу действия относится к параметрическим (под действием входного сигнала изменяется сопротивление потенциометра), а по физической природе элементов – к электромеханическим.

При проведении исследований потенциометрических датчиков часто одновременно со статической характеристикой  $U_2 = f_1(x)$  определяют его вольт-амперную характеристику (ВАХ), которая представляет собой зависимость  $I = f_2(U_2)$ , где  $I$  – ток в цепи нагрузки  $R_H$ . Следует отметить, что вольт-амперная характеристика является по сравнению со статической характеристикой менее информативной, поскольку зависимость  $I = f_2(U_2)$  изменяется с изменением сопротивления нагрузки  $R_H$ , т.е. для каждого значения  $R_H$  существует своя ВАХ.

Напряжение питания потенциометрического датчика ( $U_1$ ) может быть как постоянным, так и переменным.

При снятии характеристик потенциометрического датчика, связанного с поплавком, следует учитывать явления гистерезиса, обусловленные наличием трения в шарнирной системе, трением ползунка и прогибом соединительной рейки. Это приводит к притапливанию поплавка при подъеме уровня и, наоборот, к всплытию его при снижении уровня жидкости в баке стенда. Явление гистерезиса выражается в расхождении характеристик потенциометрического датчика при подъеме уровня и опускании уровня жидкости в баке стенда.

### **Электромагнитное реле**

Реле представляют собой одно из самых распространенных устройств современной автоматики.

**Реле** – это устройство, в котором при плавном изменении входного (управляющего) сигнала и достижении им определенного значения происходит скачкообразное изменение выходного (управляемого) сигнала.

По физической природе величин, на которые реагируют реле, их делят на **электрические, гидравлические, тепловые, магнитные** и др.

Реле обычно состоит из трех функциональных элементов: **воспринимающего, промежуточного и исполнительного**.

**Воспринимающий** элемент представляет собой преобразователь, в котором входной сигнал преобразуется в другой сигнал, иногда иной физической природы (например, в электрическом контактом реле электрический ток преобразуется электромагнитной системой в механическое усилие).

**Промежуточный** элемент сравнивает значение преобразованного сигнала с заданным значением и при его превышении передает входной сигнал на исполнительный элемент. У контактного реле промежуточным элементом является пружина.

**Исполнительный** элемент формирует выходной дискретный сигнал. У контактного реле это подвижная система, замыкающая или размыкающая электрическую цепь.

Существует большое разнообразие электрических реле. В автоматических системах наибольшее распространение получили **электромагнитные** и **электронные** реле.

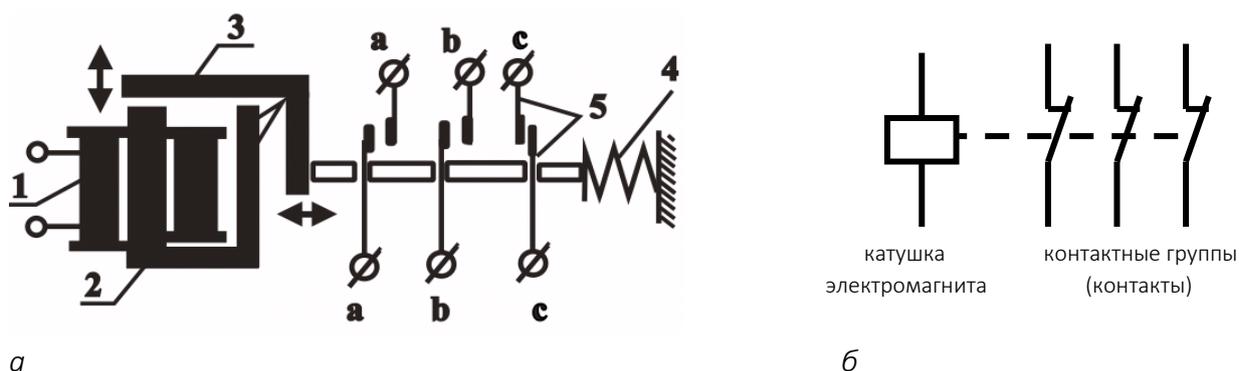
По принципу действия исполнительных элементов различают реле **контактные** и **бесконтактные**.

Наиболее часто в настоящее время применяются электромагнитные (контактные) реле.

Различают реле **постоянного** и **переменного** тока. В свою очередь, реле постоянного тока разделяют на **нейтральные** и **поляризованные**. Работа последних зависит от полярности входного сигнала.

Принцип действия электромагнитных реле основан на взаимодействии магнитного поля обмотки, по которой протекает ток, с ферромагнитным якорем. Воспринимающим элементом электромагнитного реле является обмотка, а исполнительным – контакты.

Устройство реле приведено на рисунке 1.2.



*a* – конструкция; *б* – условное обозначение в схемах

Рисунок 1.2. – Электромагнитное реле

Оно состоит из катушки электромагнита 1, сердечника 2, подвижного якоря 3, возвратной пружины 4 и контактов (контактных пружин) 5. При про-

пускании тока через катушку создается магнитный поток, благодаря чему образуется тяговое усилие. При этом якорь притягивается к сердечнику и воздействует на пружину 4. В случае, когда тяговое усилие достигает определенной величины, пружина 4 сжимается. При этом контакты *a*, *b* и *c* размыкаются. Величина тягового усилия зависит от величины напряжения на катушке электромагнита 1.

После соприкосновения якоря электромагнита с сердечником тяговое усилие электромагнита резко возрастет за счет усиления магнитного потока через сердечник и якорь, соприкоснувшийся с сердечником, поэтому ток отпущения якоря, а, следовательно, и напряжение возврата на катушке будет существенно меньше напряжения срабатывания электромагнитного реле.

При составлении схем устройств на электромагнитном реле используют условное обозначение реле. Контакты реле изображаются в таком состоянии, в каком они находятся при **обесточенной** катушке (отпущенном якоре) или при напряжении на катушке, недостаточном для перевода контактов во второе состояние, то есть контакты *a*, *b* и *c* – замкнуты (рисунок 2.1, б). Пунктирную линию, показывающую механическую связь между катушкой и контактами, изображать необязательно, но в таком случае вводятся буквенные и цифровые обозначения; катушка обозначается буквой К с порядковым номером реле, а обозначение контактов повторяет обозначение катушки, к которому через точку добавляется порядковый номер контакта.

Пример условного графического обозначения электромагнитного реле, конструкция которого показана на рисунке 1.2, приведен на рисунке 1.3.

Рассмотренное реле имеет три размыкающих контакта – К1.1., К1.2. и К1.3.

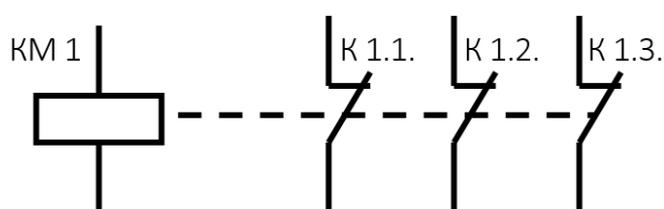


Рисунок 1.3. – Условное графическое обозначение электромагнитного реле

Следует отметить, что катушка реле и контакты между собой электрически изолированы и могут находиться в разных электрических цепях. Например, катушку реле можно питать током низкого напряжения, в то же время контакты могут управлять цепями высокого напряжения. Такое раз-

деление цепей позволяет повысить безопасность устройств. Также разделение цепей необходимо, когда напряжение управления катушкой имеет низкий уровень, а контакты установлены в линии с высоким напряжением, что имеет место в данной лабораторной работе. На стенде сигнал с выхода потенциометрического датчика уровня (напряжением менее 12 В) поступает на катушку электромагнитного реле. Контакты реле установлены в цепи управления электродвигателем (напряжение 220 В).

Электромагнитные реле характеризуются рядом параметров, важнейшими из которых являются следующие:

- параметр срабатывания  $U_{ср}, I_{ср}$ ;
- параметр возврата  $U_{в}, I_{в}$ ;
- коэффициент возврата  $k_{в}$ ;
- время срабатывания  $t_{с}$ ;
- время возврата  $t_{в}$ ;
- максимальная частота переключения;
- чувствительность (мощность срабатывания)  $W$ .

Максимальное значение входного сигнала, при котором происходит срабатывание реле, называется **параметром срабатывания  $x_{ср}$** .

Минимальное значение входного сигнала, при котором реле возвращается в исходное состояние, называется **параметром возврата  $x_{в}$** .

Параметры срабатывания и возврата связаны между собой коэффициентом возврата

$$k_{в} = \frac{x_{в}}{x_{ср}}. \quad (1.5)$$

До тех пор, пока  $x < x_{ср}$ , выходной сигнал реле  $y = 0$ . При  $x = x_{ср}$  выходной сигнал скачком изменяется от 0 до  $y_{\max}$  и реле срабатывает. Если входной сигнал уменьшить, то при достижении  $x = x_{в}$  произойдет возврат реле в исходное состояние.

### 1.3 Экспериментальная установка

Стенд НТЦ-16.46 «Автоматизация в водоснабжении и водоотведении» производства УП «НТП «Центр»» г. Могилев предназначен для проведения экспериментальных исследований основных видов систем автоматического регулирования (САР), применяемых в настоящее время в водоснабжении:

- с релейным регулированием объема жидкости в баке по уровню;
- с релейным регулированием объема жидкости в баке по давлению;
- с дроссельным регулированием уровня жидкости в баке;
- с частотным регулированием уровня жидкости в баке.

Общий вид стенда представлен на рисунке 1.4.

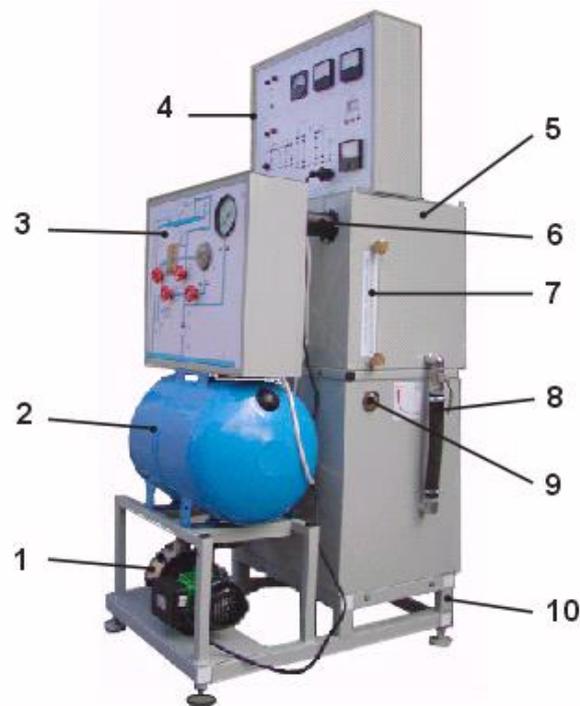


Рисунок 1.4. – Общий вид стенда

Стенд состоит из следующих основных устройств:

- 1 – центробежный насос (Н);
- 2 – пневматический бак (ПБ);
- 3 – модуль гидравлического управления (МГУ);
- 4 – модуль электрического управления;
- 5 – гидробак верхний (Б2);
- 6 – потенциометрический датчик уровня (ДУ);
- 7 – указатель уровня воды в верхнем гидробаке (УУ);
- 8 – гидробак нижний (Б1);
- 9 – указатель уровня воды в нижнем гидробаке;
- 10 – рама стенда.

Модули гидравлического и электрического управления, представляющие собой конструктивно законченные устройства, предназначены для управления, измерения регистрируемых величин и контроля за работой стенда.

На рисунке 1.5 приведена гидравлическая схема станда (эта же схема показана на передней панели модуля гидравлического управления).

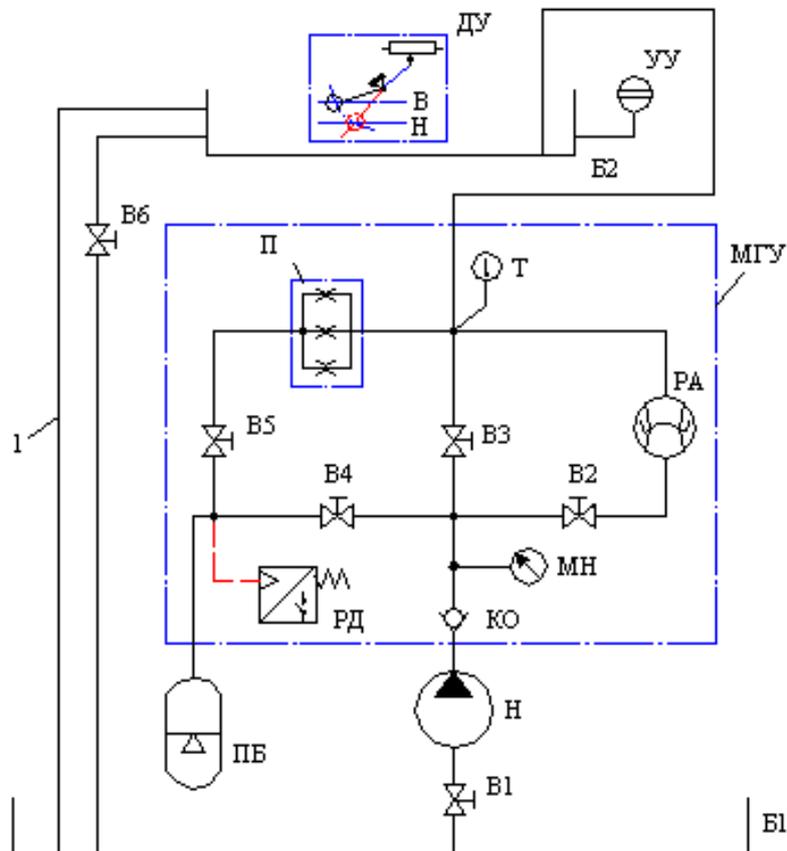


Рисунок 1.5. – Схема гидравлическая станда

В корпусе модуля гидравлического управления установлены все устройства, которые на гидравлической схеме (см. рисунок 1.5) изображены внутри прямоугольника, выделенного штрихпунктирной линией. Это следующие устройства:

- КО – клапан обратный;
- РД – реле давления;
- В1...В5 – вентили;
- П – имитатор потребителей воды;
- Т – датчик температуры;
- РА – расходомер;
- МН – манометр.

Обратный клапан в напорную линию насоса установлен с целью предотвращения утечек воды из пневматического бака ПБ через неработающий гидронасос Н в нижний гидробак Б1.

Вентиль В1 установлен во всасывающем трубопроводе, соединяющем нижний гидробак с насосом. Этот вентиль в процессе эксплуатации станда всегда открыт. Закрывают вентиль при демонтаже насоса и проведении ремонтных работ. Вентиль В6 установлен в трубопроводе, соединяющем верхний и нижний гидробаки.

В дно верхнего гидробака вварена труба перелива (гидролиния 1 на рисунке 1.5) с большим внутренним диаметром. Перелив предусмотрен на высоте 0,26 м от дна верхнего гидробака. То есть максимальный уровень воды в верхнем гидробаке примерно 0,26 м. Вода из верхнего гидробака через трубу перелива перетекает в нижний гидробак. Благодаря этому при любых ситуациях, которые только могут возникнуть при работе станда, в нижнем гидробаке всегда есть вода, что предотвращает выход из строя гидронасоса Н, так как работа насоса всухую невозможна.

Электрическая схема станда приведена на рисунке 1.6 (эта же схема показана на передней панели модуля электрического управления).

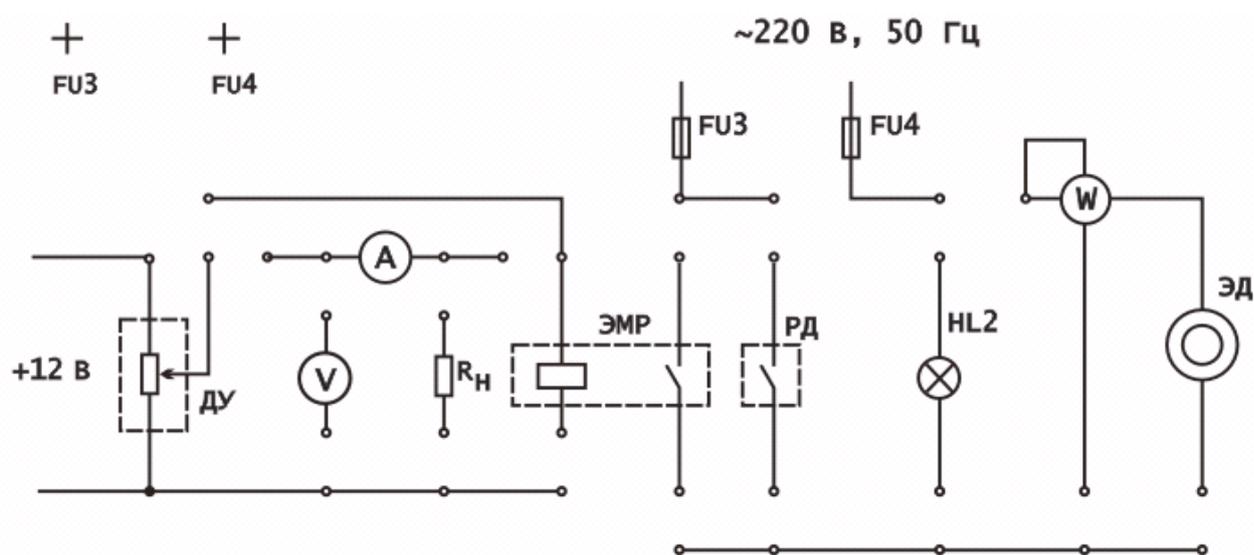


Рисунок 1.6. – Электрическая схема станда

На схеме обозначено:

ДУ – потенциометрический датчик уровня (установлен в верхнем гидробаке, поз. 6 на рисунке 1.4);

ЭМР – электромагнитное реле;

РД – реле давления (установлено в корпусе модуля гидравлического управления);

ЭД – электродвигатель привода гидронасоса;

$R_n$  – сопротивление нагрузки;

A, V, W – амперметр, вольтметр, ваттметр соответственно;

HL2 – лампочка световой индикации.

Напряжение питания электрической системы 220 В, ток переменный, 50 Гц. Напряжение питания потенциометрического датчика уровня – 12 В, ток постоянный.

В линиях питания электрической системы стенда (на входе) установлены предохранители FU1, FU2, FU3 и FU4, а также предусмотрена световая индикация исправности электрической системы (HL1).

Структурирование электрической системы стенда осуществляется путем установки переключателей со штекерами в гнезда, установленные на передней панели модуля электрического управления. Установка переключателей производится в соответствии со схемой электрических соединений, приводимой в методических указаниях к каждой лабораторной работе. Места установки переключателей на схемах отмечены “жирной” штриховой линией.

Включение питания стенда осуществляется путем установки тумблера «СЕТЬ» в верхнее положение.

## 1.4 Проведение испытаний

### 1.4.1 Снятие характеристик потенциометрического датчика

#### Подготовка установки к работе

Перед включением установки необходимо:

– С помощью переключателей со штекерами обеспечить схему электрических соединений в соответствии с рисунком 1.7 (на передней панели модуля электрического управления).

– Убедиться по указателю уровня 7 (рисунок 1.4), что в верхнем баке (поз. 5) отсутствует вода. Если верхний бак заполнен водой, то, открыв вентиль 6, необходимо слить воду из верхнего бака в нижний бак (поз. 8). Вентиль В6 открыт, когда рукоятка управления установлена параллельно оси трубопровода. После слива воды из верхнего гидробака вентиль 6 необходимо закрыть.

– На модуле гидравлического управления вентиль В3 открыть, а вентили В2, В4 и В5 – закрыть (закрытие вентилей осуществляется путем вращения маховика управления по часовой стрелке, а открытие – вращением против часовой стрелки. При управлении вентилями рекомендуется не прикладывать больших усилий).

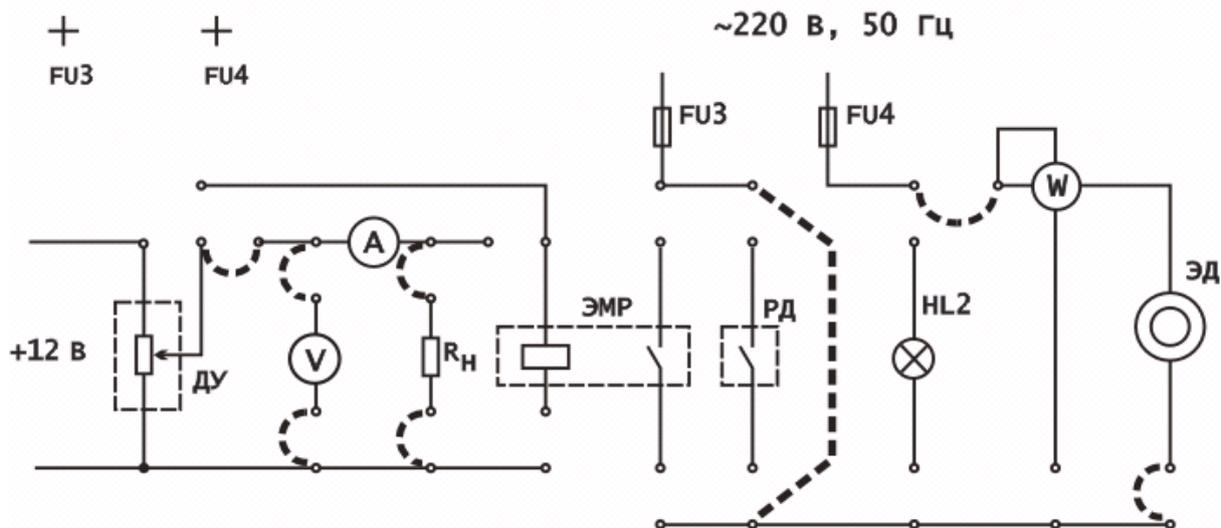


Рисунок 1.7. – Схема электрических соединений  
(к лабораторной работе 1, ч. 1)

### Методика испытаний

После выполнения условий, описанных в п. 1.4.1, необходимо:

1. Включить электрическое питание стенда. Для этого тумблер «СЕТЬ» установить в верхнее положение.

2. Провести экспериментальные исследования характеристик потенциометрического датчика **при заполнении** верхнего гидробака стенда. При этом, периодически включая и выключая насос с помощью выключателя, установленного на электродвигателе, заполнить верхний гидробак до уровня, при котором начнется перелив воды из верхнего гидробака в нижний. Во время выключения насоса необходимо фиксировать:

- координату  $x$  – уровень воды в верхнем баке (по шкале указателя уровня). Нижнее деление указателя уровня принять за нулевое;
- напряжение  $U_2$  (по вольтметру);
- силу тока  $I$  (по амперметру).

Первое отключение насоса желательно выполнить в тот момент, когда уровень воды в стеклянной трубке совпадет с нулевым делением указателя. Дальнейшие отключения насоса производить примерно через каждые десять делений. Таким образом, при управлении насосом необходимо следить за уровнем воды в верхнем гидробаке.

3. Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

4. После максимального заполнения верхнего гидробака отключить насос переключателем и, приоткрывая вентиль В6 и перепуская воду из верхне-

го бака в нижний, произвести исследования характеристик потенциометрического датчика, но уже не при заполнении, а **при опорожнении** верхнего гидробака. измерения необходимо производить при закрытом вентиле В6.

5. Результаты измерений занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.1. – Результаты измерений при заполнении бака

Номер измерения	$x$ – уровень воды в баке в делениях	$U_2$ – напряжение на выходе датчика, В	$I$ – сила тока в цепи нагрузки, А
1			
...			
6			

Таблица 1.2. – Результаты измерений при опорожнении бака

Номер измерения	$x$ – уровень воды в баке в делениях	$U_2$ – напряжение на выходе датчика, В	$I$ – сила тока в цепи нагрузки, А
1			
...			
6			

После проведения всех измерений необходимо отключить электрическое питание стенда и снять перемычки со штекерами с модуля электрического управления.

### Обработка результатов

По результатам экспериментов необходимо построить графические зависимости:  $U_2 = f(x)$  и  $I = f(U_2)$ . Графические зависимости при заполнении и опорожнении бака строить на одном графике с тем, чтобы выявить наличие гистерезиса в статических характеристиках датчика.

Гистерезис датчика определяется по разности напряжения в ветвях подъема и опорожнения бака на одних и тех же уровнях в баке – 20, 30 и 40 делений. Значения гистерезиса заносятся в отчет.

## 1.4.2 Снятие характеристик электромагнитного реле

### Подготовка установки к работе

Описание экспериментальной установки приведено в подразделе 1.3.

**Объектом исследований** в данной работе является электромагнитное реле, которое управляет тремя контактами.

При отсутствии или при низком значении напряжения на катушке контакты замкнуты, то есть питание электродвигателя включено (см. рисунок 1.7).

При подъеме уровня воды в верхнем баке и достижении напряжением значения, соответствующего верхнему порогу срабатывания реле (параметр срабатывания  $x_{cp}(U_{cp})$ ) – контакты размыкаются и отключают электродвигатель.

При снижении уровня воды в баке и достижении напряжением значения возврата реле в исходное состояние (параметр возврата  $x_v(U_v)$ ) – контакты реле под действием пружины замыкаются и включают электродвигатель.

Перед включением установки необходимо:

1. С помощью перемычек со штекерами обеспечить схему электрических соединений в соответствии с рисунком 1.8 (на передней панели модуля электрического управления).

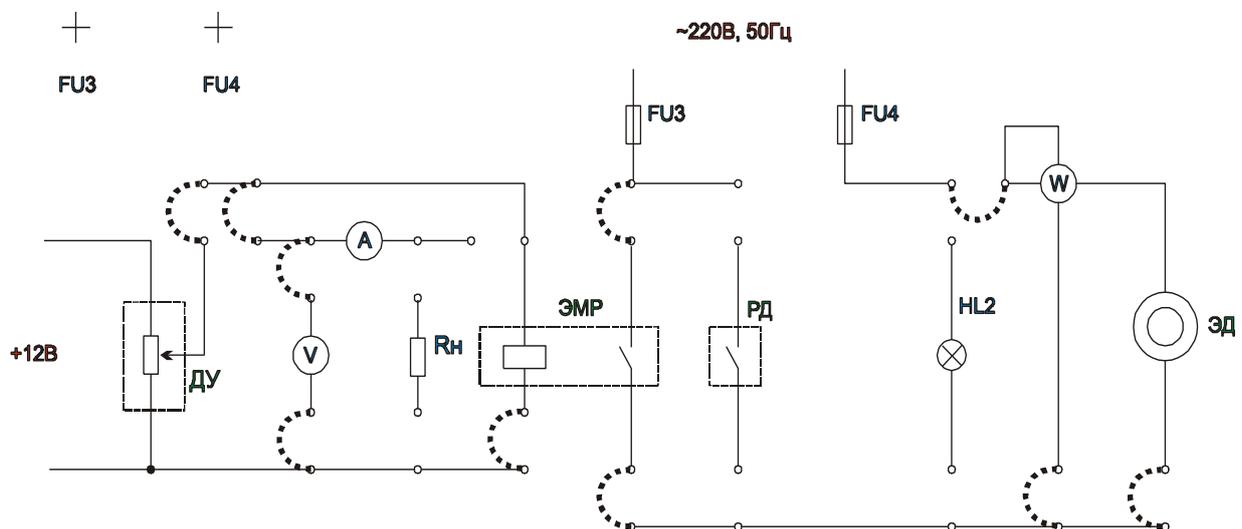


Рисунок 1.8. – Схема электрических соединений

2. Убедиться по указателю уровня, что в верхнем баке отсутствует вода. Если верхний бак заполнен водой, то, открыв вентиль В6, необходимо слить воду из верхнего бака в нижний бак. После слива воды из верхнего бака вентиль В6 необходимо закрыть.

3. На модуле гидравлического управления вентиль В3 открыть, а вентили В2, В4 и В5 – закрыть.

### Методика испытаний

После выполнения условий, описанных в п. 1.4.2.1, необходимо:

1. Включить электрическое питание стенда. Для этого тумблер «СЕТЬ» на модуле электрического управления необходимо установить

в верхнее положение . При этом включится насосная установка и вода будет поступать в верхний бак. При достижении напряжением на катушке электромагнитного реле уровня, соответствующего параметру срабатывания  $x_{cp}$  (верхнего уровня воды в баке), реле разомкнет контакт в цепи управления и электродвигатель отключится. По вольтметру необходимо зафиксировать напряжение  $U$ , при котором произойдет отключение насосной установки ( $U = x_{cp}$ ). Результат измерения занести в таблицу 1.3.

2. Открыть вентиль В6. В результате вода начнет перетекать в нижний бак. При достижении напряжением на катушке электромагнитного реле уровня, соответствующего параметру возврата  $x_в$  (нижнего уровня воды в баке), реле замкнет контакт и включит насосную установку. По вольтметру необходимо зафиксировать напряжение  $U_в$ , при котором произойдет включение насосной установки ( $U_в = x_в$ ). Результат измерения занести в таблицу 1.3.

3. Опыты необходимо повторить три раза. Результаты измерений занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Результаты исследований электромагнитного реле

№ опыта	Параметр срабатывания $x_{cp}$ (напряжение $U_{cp}$ , В)	Уровень в баке	Параметр возврата $x_в$ (напряжение $U_в$ , В)	Уровень в баке	Коэффициент возврата $k_в$
1					
2					
3					

После проведения измерений необходимо отключить электрическое питание стенда и снять перемычки со штекерами с модуля электрического управления.

### Обработка результатов

Для каждого опыта необходимо по формуле (1.5) определить коэффициент возврата  $k_в$  и занести в таблицу 1.3.

По результатам трех опытов необходимо определить среднее арифметическое  $k_в$ .

Параметры срабатывания и возврата – это напряжения на катушке исследуемого электромагнитного реле.

Нанести их на график  $U_2 = f(x)$ , полученный в п. 1.4.1.4., и определить объем воды, накапливаемый в верхнем гидробаке после включения насоса до его отключения.

## 1.5 Контрольные вопросы

1. Стенд для экспериментальных исследований устройств и систем автоматического регулирования: назначение, схемы (гидравлическая и электрическая), информационно-измерительная система, устройство, управление.
2. Назначение датчиков, используемых в системах автоматического регулирования. Назначение и устройство потенциометрических датчиков.
3. Какие характеристики датчиков называют статическими? Какие статические характеристики у потенциометрического датчика уровня поплавкового типа? Назначение статических характеристик.
4. Методика определения статических и вольт-амперных характеристик потенциометрического датчика.
5. Чем объяснить наличие гистерезиса в статических характеристиках потенциометрического датчика?
6. Назначение и классификация электромагнитных реле.
7. Устройство и обозначение электромагнитного реле.
8. Основные характеристики электромагнитного реле.
9. Используя схему 1.2 и реальную конструкцию реле или макет, поясните принцип работы электромагнитного реле.
10. Поясните методику исследований электромагнитного реле, установленного на стенде.

**Лабораторная работа 2**  
**ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ,**  
**ПОВЕРКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ «САПФИР-22ДД»**

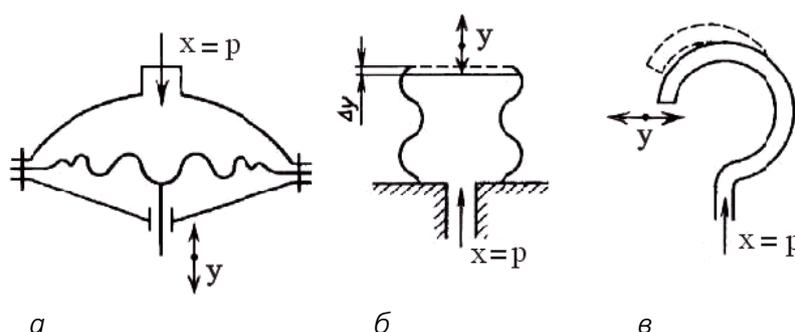
**2.1 Цель работы**

1. Изучение устройства и принципа действия измерительного преобразователя перепада давления «САПФИР-22ДД».
2. Выполнение поверки прибора.

**2.2 Общие сведения**

**2.2.1 Датчики давления**

Широкое применение в системах автоматического управления, контроля, защиты, диагностики, измерения находят датчики давления.



***a* – мембранный; *б* – сильфонный; *в* – трубчатый**

**Рисунок 2.1. – Схемы первичных преобразователей датчиков давления**

Чувствительные элементы датчиков давления выполняют в виде мембран и пружин различной конфигурации. Если датчик давления содержит только первичный преобразователь, то давление преобразуется в перемещение упругого элемента, т.е. выходной величиной первичного преобразователя является перемещение. Так, в мембранном преобразователе (рисунок 2.1, *a*) деформация мембраны  $y$  пропорциональна давлению  $p$ , в сильфонном (рисунок 2.1, *б*) – гофрированный тонкостенный стакан изменяет свою длину пропорционально давлению; в преобразователе с трубчатой пружиной (рисунок 2.1, *в*) упругая трубка овального сечения, т.н. трубка Бурдона, под действием давления выпрямляется, форма ее сечения напоминает круг, а запаянный конец трубки перемещается.

Датчики давления могут быть снабжены вторичными преобразователями различных типов: реостатным, контактным, электротепловым. На их выходе формируется электрический информационный сигнал. Вторичным преобразователем может быть и указатель давления, используемый в обычных приборах контроля давления – пружинных манометрах, получивших очень широкое распространение (рисунок 2.2).

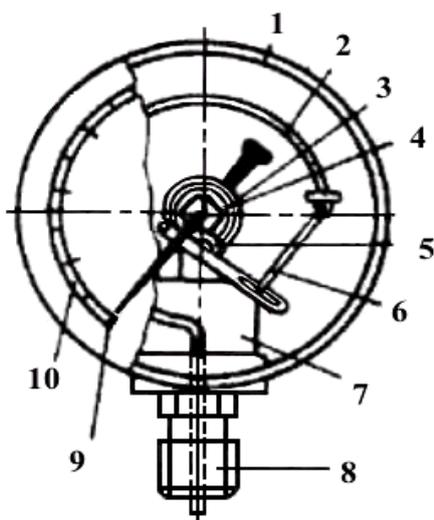


Рисунок 2.2. – Пружинный манометр

Чувствительным элементом пружинного манометра является трубчатая пружина 2. Пружина открытым концом жестко соединена с держателем 7, укрепленным в цилиндрическом корпусе 1 манометра. Держатель имеет штуцер 8, предназначенный для соединения манометра с линией гидросети или пневмосети. Свободный конец трубчатой пружины закрыт пробкой с шарнирной осью и запаян. При помощи тяги 6 он связан с передаточным механизмом, состоящим из зубчатого сектора 5, находящегося в зацеплении с зубчатым колесом 4. Рядом с зубчатым колесом расположена спиральная пружина (волосок) 3, один конец которой соединен с зубчатым колесом, а другой закреплен неподвижно на стойке, поддерживающей передаточный механизм. Волосок постоянно прижимает зубчатое колесо к одной стороне зубцов сектора 5, благодаря чему устраняется мертвый ход в зубчатом зацеплении передаточного механизма. Отсчетное устройство манометра состоит из шкалы 10 и стрелки 9.

Принцип действия пружинного манометра заключается в следующем. При подводе к штуцеру манометра рабочей среды под давлением,

в результате деформации стенок трубчатой пружины, ее свободный конец перемещается пропорционально давлению. Это перемещение при помощи тяги и передаточного механизма передается стрелке. Таким образом, выходным сигналом манометра является показание, отсчитываемое по шкале.

### 2.2.2 Датчики перепада давления

Преобразователи предназначены для работы в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами и обеспечивают непрерывное преобразование значения измеряемого параметра – давления избыточного, абсолютного, разрежения, разности давлений нейтральных и агрессивных сред в унифицированный токовый выходной сигнал дистанционной передачи. Преобразователи разности давлений могут использоваться для преобразования значений уровня жидкости, расхода жидкости или газа, а преобразователи гидростатического давления – для преобразования значений уровня жидкости в унифицированный токовый выходной сигнал.

Принцип действия преобразователя основан на использовании тензоэффекта в полупроводниковом материале. Измеряемый параметр поступает в камеру измерительного блока, где линейно преобразуется в деформацию чувствительного элемента и изменения электрического сопротивления тензорезисторов тензопреобразователя, размещенного в измерительном блоке.

Чувствительным элементом тензопреобразователя пластина из монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами. Основное свойство тензорезисторов – способность изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от степени прогиба мембраны тензопреобразователя.

В данной лабораторной работе используется датчик «САПФИР-22ДД». Конструкция измерительного (сенсорного) блока показана на рисунке 2.3. Тензопреобразователь 4 мембранно-рычажного типа размещен внутри основания 2 в заполненной кремнийорганической жидкостью полости. Он отделен от измеряемой среды металлическими гофрированными мембранами 1, которыми по наружному контуру приварены к основанию и соединены между собой центральным штоком 3, связанный с концом рычага тензопреобразователя. Воздействие разности давлений вызывает прогиб мембраны 1, изгиб мембраны 8 тензопреобразователя, изменение

сопротивления тензорезисторов 5. Электрический сигнал с тензомодуля передается из полости высокого давления во встроенное электронное устройство 6 по проводам через гермовывод 7. Измерительный блок выдерживает без разрушения воздействие односторонней перегрузки рабочим давлением. Это обеспечивается тем, что при односторонней перегрузке мембрана 1 после дополнительного перемещения ложится на профилированную подушку. Преобразователь взрывозащищенный типа «Сапфир» состоит из 2 функциональных устройств – первичного преобразователя, включающего в себя измерительный блок и встроенное электронное устройство, и блока преобразования сигналов БПС-24 в унифицированный сигнал 0–5 мА.

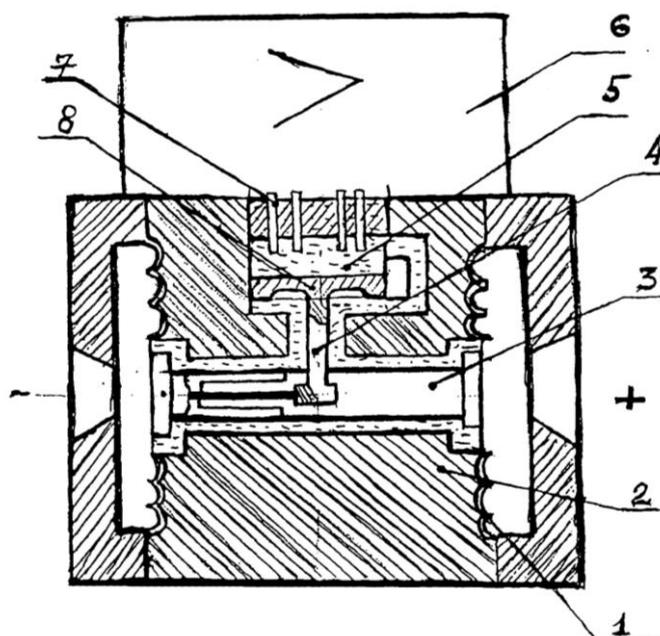


Рисунок 2.3. – Мембранный манометр «САПФИР-22ДД»

### 2.2.3 Поверка датчиков

Важнейшей характеристикой манометра является **класс точности** (указывается на циферблате). Промышленные манометры бывают следующих классов точности: 0,15; 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Допустимую погрешность измерения давления манометром определяют из следующего выражения:

$$\delta = \frac{K \cdot P}{100}, \quad (2.1)$$

где  $K$  – класс точности манометра;  
 $P$  – верхний предел измерения давления.

Таким образом, чем меньше число, указывающее на класс точности, тем точнее манометр.

При измерении любой физической величины с помощью различных средств измерений, как бы тщательно не осуществлялось измерение, невозможно получить результат, свободный от искажений. Эти искажения могут возникать вследствие несовершенства применяемых методов и средств измерений, влияния на показания прибора условий измерения и ряда других причин. Искажения, сопровождающие всякое измерение, обуславливают **погрешности измерений** – отклонение результата измерений от истинного значения измеряемой величины.

Различают абсолютную и относительную погрешности измерения.

**Абсолютная погрешность** измерения выражается в единицах измеряемой величины и определяется по формуле

$$\Delta = A - A_0,$$

где  $A$  – значение, полученное при измерении;  $A_0$  – истинное значение измеряемой величины.

На практике вместо понятия «истинное значение» пользуются обычно понятием **действительное значение** измеряемой величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что оно может быть использовано вместо истинного.

**Относительная погрешность**  $\delta_o$  выражается в процентах и определяется по формуле

$$\delta_o = ((A - A_0) / A_0) \cdot 100 = \Delta / A_0 \cdot 100\%. \quad (2.2)$$

В измерительной технике используют также понятие **приведенной погрешности**.

**Приведенной погрешностью**  $\delta_{пр}$  называют отношение абсолютной погрешности измерения к полному размаху шкалы прибора, выраженное в процентах:

$$\delta_{пр} = (\Delta / (A_k - A_n)) \cdot 100\% \quad (2.3)$$

где  $A_n$  и  $A_k$  – показания прибора в начале и конце шкалы.

**Вариацией** называется небольшая экспериментально разность между показаниями измерительного прибора, соответствующая одному и тому же действительному значению измеряемой величины при прямом и обратном ходах (в неизменных условиях измерения):

$$B = A_{\text{п}} - A_{\text{об}},$$

где  $A_{\text{п}}$  и  $A_{\text{об}}$  – показания измерительного прибора при прямом и обратном ходах.

Вариации вызываются трением в механизме прибора, гистерезисом, остаточными деформациями в упругих элементах прибора и т.д. Вариация, выраженная в процентах от размаха шкалы прибора, должна быть меньше допустимой основной погрешности прибора:

$$B_{\text{пр}} = ((A_{\text{п}} - A_{\text{об}}) / (A_{\text{к}} - A_{\text{н}})) 100\%. \quad (2.4)$$

Метрологической характеристикой точности большинства технических средств измерений являются пределы основной и дополнительной погрешностей.

**Основной погрешностью** называется погрешность средства измерения, используемого в нормальных условиях его эксплуатации, определяемых ГОСТами или другими техническими условиями на средства измерений. Под нормальными понимают такие условия эксплуатации прибора, при которых влияющие на измерение величины (температура, давление, влажность окружающего воздуха, напряжение питания, уровень вибраций и т.п.) находятся в пределах допустимых значений.

**Дополнительной** называется погрешность, возникающая при выходе параметров, характеризующих условия эксплуатации прибора, за область допустимых значений.

Под пределами основной и дополнительной погрешности понимают наибольшую (без учета знака) соответствующую погрешность средства измерений, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению. Пределы допустимых основной и дополнительной погрешностей средств измерений устанавливаются в виде абсолютных и приведенных погрешностей.

Для оценки точности работы средств измерений, предназначенных для различных целей (но не точности измерений, выполненных этими устройствами), установлены так называемые классы точности измерительной аппаратуры.

**Класс точности** – это обобщенная характеристика средств измерений, определяемая пределами допустимых основной и дополнительной погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющих на их точность, значения которых регламентируются стандартами. Под классом точности понимают число, соответствующее абсолютной величине допустимой основной приведенной погрешности. Это число приводится на шале прибора или его технической характеристике. Классы точности прибора выбираются из ряда

$$K = (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0; 5,0; 6,0)10^n, \quad (2.5)$$

где  $n = 0; 1; 2; \dots$

Приборы автоматического контроля выпускаются классом точности от 0,2 до 4,0.

Для определения фактической погрешности измерительных приборов их периодически подвергают поверке.

**Поверкой** называется комплекс мероприятий, проводимых с целью установления работоспособности прибора и достоверности его показаний. Поверка измерительных приборов заключается в определении его наибольшей приведенной погрешности и сравнении ее с классом точности данного прибора. Прибор считается годным для эксплуатации, если его наибольшая приведенная погрешность и вариация, определяемая по формуле (2.4) не превышает присвоенный ему класс точности.

Приведенная погрешность и вариация определяются для всех оцифрованных отметок шкалы поверяемого прибора при прямом и обратном ходах измерений. Данные поверки заносятся в протокол.

### 2.3 Выполнение работы

1. Ознакомиться с лабораторным стендом и установленными на нем приборами.
2. Ознакомиться с принципом действия датчика серии «Сапфир-22ДД».
3. Выполнить поверку прибора серии «Сапфир-22ДД». Действительные значения уровня определяются по шкале, нанесенной на сосуде. Поверка производится на всех ее оцифрованных отметках.
4. Результаты занести в протокол испытаний (таблица 2.1).
5. Измерения повторить три раза.

Таблица 2.1

Действительные	Показания поверяемого прибора		Погрешность манометра			
			абсолютная		приведенная	
	прямой	обратный	прямой	обратный	прямой	обратный

## 2.4 Оформление отчета

Основная часть отчета должна содержать разделы:

1. Цель и задачи лабораторной работы.
2. Методику выполнения поверки прибора.
3. Описание и принцип действия поверяемого прибора.
4. Протоколы измерений.
5. Выводы по работе.

## 2.5 Контрольные вопросы

1. Преобразователи. Виды. Конструкции.
2. В чем заключается принцип действия измерительных преобразователей
3. Перечислите все виды погрешностей и дайте их определения.
4. Как определяется класс точности приборов?
5. Для чего выполняется поверка приборов?
6. В чем заключается принцип действия датчика типа «Сапфир»?
7. Что является чувствительным элементом этого датчика?
8. Что такое унифицированный сигнал датчика?

**Лабораторная работа 3**  
**ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ РАСХОДОМЕРОВ**  
**И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ ТЕПЛОСЧЕТЧИКА**

**3.1 Цель работы**

1. Изучение методов измерения расхода и конструкций расходомеров.
2. Экспериментальное исследование алгоритма работы теплосчетчика для водяных систем.
3. Исследование принципа работы вихревого теплогенератора (ВТГ). Определение причин завышения количества тепла, вычисляемого теплосчетчиком при работе ВТГ.

**3.2 Краткие теоретические сведения**

Для измерения расхода жидкости используются:

- объемный метод;
- метод переменного и постоянного перепада давления (дросселирующие устройства и расходомеры обтекания);
- метод скоростного напора (напорные трубки);
- метод переменного уровня (щелевые расходомеры);
- ультразвуковой метод;
- электромагнитный метод;
- тахометрический метод;
- инерциальный метод и многие другие.

Некоторые из этих методов определения расхода стандартизованы и используются для формирования систем автоматического регулирования.

Наиболее широко в промышленных условиях используется метод расчета расхода по перепаду статического давления на местном гидравлическом сопротивлении (дроссельной шайбе, сужающем устройстве и т.д.)

**ГОСТ 8.586-2005 ГСИ «Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств»**

Объемный расход рассчитывается по формуле (3.1)

$$V = FS \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}, \quad (3.1)$$

где  $S$  – коэффициент сужающего устройства;

$P_1$  и  $P_2$  – статическое давление потока жидкости или газа до и после сужающего устройства;

$\rho$  – плотность жидкости или газа.

В настоящее время этот метод измерения расхода в системах тепло- и водоснабжения жилищно-коммунальных хозяйств и в целом в промышленности используется все реже, т.к. требует наличия высокоточного датчика перепада давлений и содержит местное гидравлическое сопротивление, являющееся источником дополнительных потерь энергии.

**ГОСТ 8.611-2013 ГСИ «Расход и количество газа. Методика (метод) измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода»**

Схема метода измерений объемного расхода показана на рисунке 3.1.

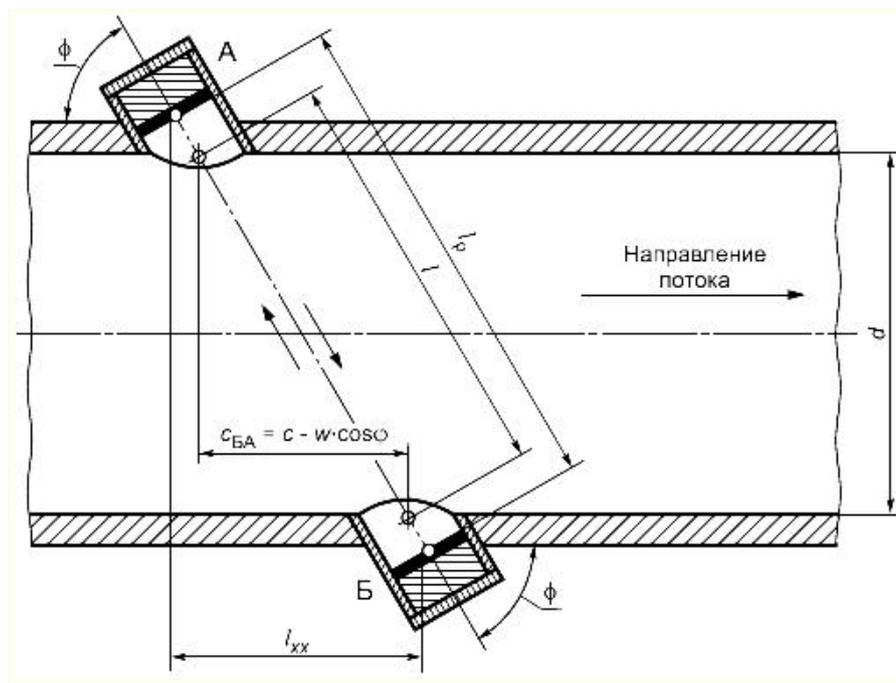


Рисунок 3.1. – Схема ультразвукового расходомера

Объемный расход определяют как

$$V = F \frac{C - C_{БА}}{\cos \phi}, \quad (3.2)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения трубопровода;

$C$  – скорость звука в неподвижной среде;

$C_{БА}$  – измеренная скорость звука на линии А-Б в направлении от излучателя Б к приемнику А.

Метод основан на измерении разности скорости звука в движущейся и неподвижной среде, которая будет численно равна эффективной скорости движения жидкости или газа в трубопроводе.

### ГОСТ Р 8.675-2009 ГСИ «Расходомеры электромагнитные»

Расходомеры предназначены для измерения расхода и объема жидкости с удельной электропроводностью более  $5 \cdot 10^{-3}$  См/м.

Электромагнитный расходомер – это измерительный прибор, работа которого основана на принципе электромагнитной индукции. В соответствии с принципом электромагнитной индукции при движении электрического проводника через магнитное поле под прямым углом ( $90^\circ$ ) к полю, в проводнике индуцируется напряжение. Для индукции напряжения необходимо наличие трех факторов: проводника, магнитного поля и перемещения проводника относительно магнитного поля. Чем больше относительное перемещение, тем выше полученное напряжение.

Электромагнитный расходомер (рисунок 3.2) состоит из трубы с комплектом соленоидов, закрепленных на внешней поверхности трубы.

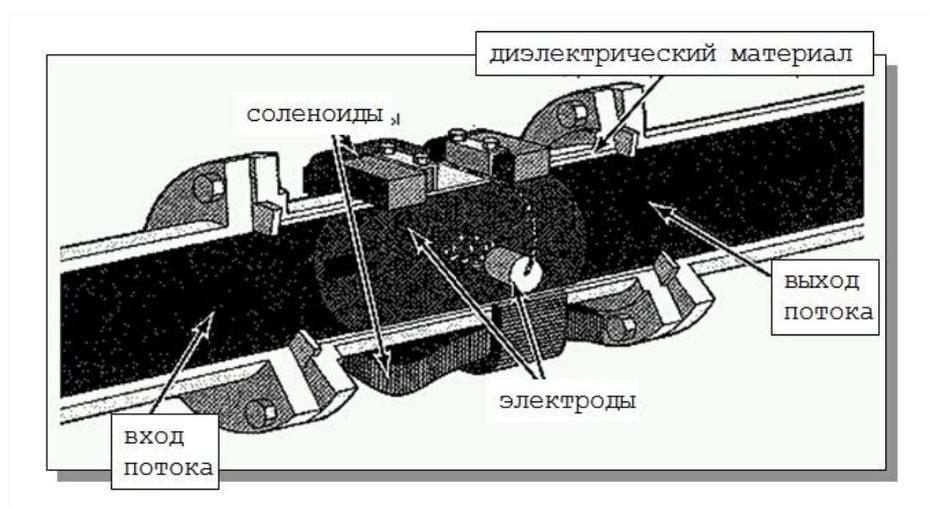


Рисунок 3.2. – Схема электромагнитного расходомера

Соленоиды используются для создания магнитного поля, необходимого для получения напряжения. Во избежание потери напряжения, труба электромагнитного расходомера покрыта диэлектрическим (непроводящим электрический ток) материалом.

Величина ЭДС, индуцируемая в потоке определяется по формуле:

$$E = BDW_{cp}, \quad (3.3)$$

где  $B$  – магнитная индукция в теслах;

$D$  – диаметр трубопровода;

$W_{cp}$  – средняя скорость потока электропроводящей жидкости.

Другим распространенным методом измерения расхода является использование расходомера-счетчика (тахометрический метод).

**Механические расходомеры-счетчики** бывают двух типов: **объемные** и **скоростные**.

Принцип действия **объемных расходомеров** основан на попеременном заполнении и опорожнении рабочей (рабочих) камеры (камер). Число заполнений или опорожнений, подсчитываемое с помощью специальных устройств (механических, электрических), характеризует расход через систему.

Достоинством объемных расходомеров является высокая точность измерения: максимальная относительная погрешность не превышает 1%. Недостаток – громоздкость и сложность конструкций, а для некоторых расходомеров – невозможность применения для загрязненных жидкостей.

Объемные расходомеры бывают следующих типов: дисковые, поршневые, шестеренные, кольцевые и лопастные.

Для измерения расхода воды чаще всего применяют **скоростные расходомеры**.

На рисунке 3.3 изображена типовая схема скоростного расходомера.

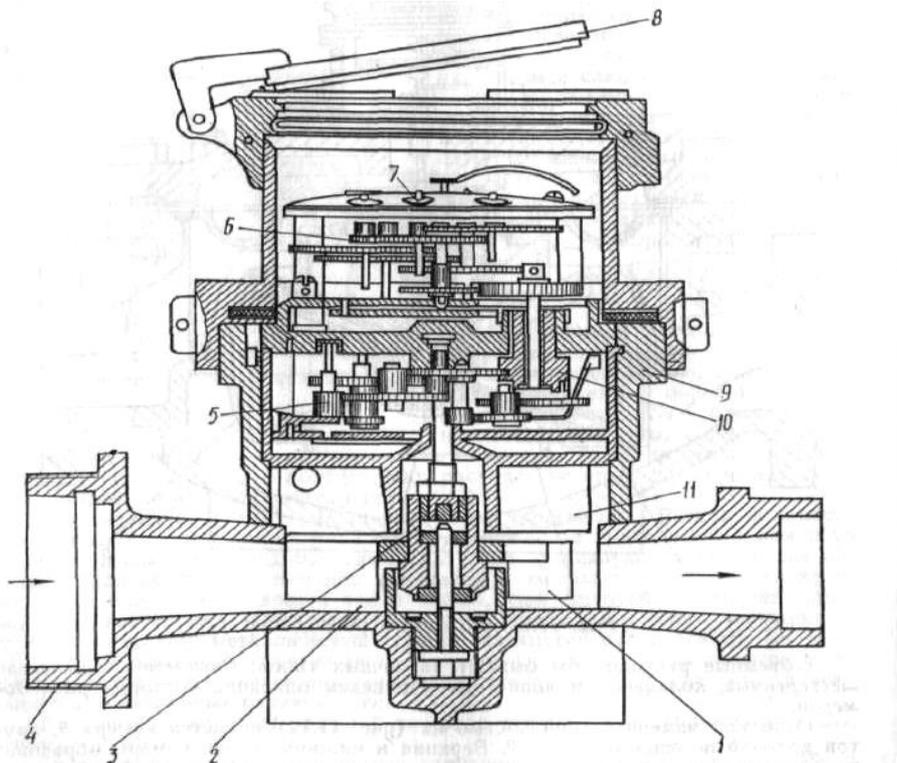


Рисунок 3.3. – Схема крыльчатого скоростного расходомера

Принцип действия **скоростных расходомеров** основан на том, что жидкость, протекающая через прибор, приводит во вращение крыльчатку или вертушку, частота вращения которой пропорциональна скорости потока и, следовательно, расходу. Ось крыльчатки или вертушки посредством передаточных механизмов соединена со счетчиком.

Основными элементами крыльчатого одноструйного расходомера (см. рисунок 3.3) являются:

1 – крыльчатка; 2 – камера крыльчатки; 3 – агатовый подшипник; 4 – входной патрубок; 5 – редуктор; 6 – механизм счетчика; 7 – циферблат; 8 – крышка циферблата; 9 – корпус; 10 – сальник; 11 – лопасть регулятора.

Скоростные расходомеры по конструкции проще объемных, но обладают меньшей точностью измерений. Максимальная относительная погрешность измерений может достигать 2...3%.

По конструктивному признаку скоростные расходомеры разделяются на две основные группы: **крыльчатые** расходомеры, ось вращения крыльчатки которых перпендикулярна направлению движения жидкости, и **турбинные** (аксиальные) расходомеры, у которых ось вращения вертушки (турбинки) параллельна направлению движения жидкости.

В системах автоматического управления вместо механической части привода циферблата объемных или скоростных расходомеров используется электрическая схема генерации импульсов, частота следования которых равна или пропорциональна частоте заполнения-опорожнения рабочих камер или скорости вращения вертушки скоростного расходомера.

Могут быть также комбинированные расходомеры и расходомеры, построенные на иных принципах работы.

### Теплосчетчики ГОСТ Р 51649-2000

Известно, что прямых методов измерения количества тепловой энергии в перекачиваемых жидкостях и газах не существует. Для оценки теплового потока (количества переносимой теплоты в единицу времени) используется формула (3.4)

$$Q = hV\rho, \quad (3.4)$$

где  $h$  – энтальпия (удельное теплосодержание) жидкости или газа;

$\rho$  – плотность жидкости или газа;

$V$  – измеренный объемный расход.

$h$  и  $\rho$  являются табличными величинами или вычисляются по унифицированным эмпирическим зависимостям по измеренным давлению и температуре.

Эмпирические зависимости представляют собой достаточно сложные полиномиальные формулы, которые для обеспечения необходимой точности расчетного определения параметров состоят из 18–24 слагаемых.

В настоящее время эти формулы стандартизованы:

**МИ 2412-97. ГСИ. Водяные системы теплоснабжения. Уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя.**

**МИ 2451-98 Рекомендация. ГСИ. Паровые системы теплоснабжения. Уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя.**

В качестве примера таких формул можно рассмотреть выражения для плотности и энтальпии (теплосодержания) перегретого пара согласно МИ 2451-98, водимые в расчетные блоки счетчиков тепла.

Плотность перегретого водяного пара определяется по формуле (3.5)

$$\rho = \frac{73,874969 \cdot \pi}{\tau \cdot Z}, \quad (3.5)$$

$$\text{Удельный объем по формуле } v = \frac{1}{\rho},$$

где  $\rho$  – плотность перегретого водяного пара, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – удельный объем перегретого водяного пара, м<sup>3</sup>/кг

$\tau$  – приведенная температура, равная:  $\tau = (t + 273) / 647,14$ , где  $t$  [°C];

$\pi$  – приведенное давление:  $\pi = P / 22,064$ , где  $P$  – давление в [МПа];

$Z$  – коэффициент сжимаемости перегретого водяного пара, рассчитываемый по формуле (3.6)

$$\begin{aligned} Z = & 1 + \pi \cdot \left( \frac{0,4409392}{\tau} - \frac{1,386598}{\tau^2} + \frac{1,380501}{\tau^3} - \frac{0,7644377}{\tau^4} \right) + \\ & + \pi^2 \cdot \left( \frac{56,40548}{\tau} - \frac{297,0161}{\tau^2} + \frac{617,8258}{\tau^3} - \frac{634,747}{\tau^4} + \frac{322,8009}{\tau^5} - \frac{65,45004}{\tau^6} \right) + \\ & + \pi^3 \cdot \left( \frac{149,3651}{\tau} - \frac{895,0375}{\tau^2} + \frac{2123,035}{\tau^3} - \frac{2488,625}{\tau^4} + \frac{1439,213}{\tau^5} - \frac{327,7709}{\tau^6} \right) + \\ & + \pi^4 \cdot \left( 151,1386 - \frac{967,3387}{\tau} + \frac{2478,739}{\tau^2} - \frac{3178,106}{\tau^3} + \frac{2038,512}{\tau^4} - \frac{523,2041}{\tau^5} \right); \end{aligned} \quad (3.6)$$

где  $t$  – температура, °C;

$P$  – абсолютное давление, МПа, 1 Мпа = 10 бар.

Энтальпию перегретого водяного пара  $h$  определяется по формуле (3.7)

$$\begin{aligned}
 h = & \left( 10258,8 - \frac{20231,3}{\tau} + \frac{24702,8}{\tau^2} - \frac{16307,3}{\tau^3} + \frac{5579,31}{\tau^4} - \frac{777,285}{\tau^5} \right) + \\
 & + \pi \cdot \left( -\frac{355,878}{\tau} + \frac{817,288}{\tau^2} - \frac{845,841}{\tau^3} \right) - \pi^2 \cdot \left( \frac{160,276}{\tau^3} \right) + \\
 & + \pi^3 \cdot \left( -\frac{95607,5}{\tau} + \frac{443740}{\tau^2} - \frac{767668}{\tau^3} + \frac{587261}{\tau^4} - \frac{167657}{\tau^5} \right) + \\
 & + \pi^4 \cdot \left( \frac{22542,8}{\tau^2} - \frac{84140,2}{\tau^3} + \frac{104198,0}{\tau^4} - \frac{42886,7}{\tau^5} \right),
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

где  $h$  – энтальпия перегретого водяного пара, кДж/кг.

Обычно для водяных систем, не требующих высокой точности измерений, используется упрощенная формула для расчета тепловой энергии

$$Q = V\rho C(t_{пр} - t_{обр}), \tag{3.8}$$

где  $V$  – измеренный объемный расход потока жидкости;

$\rho$  – плотность жидкости (для воды принимается  $\rho=1$  кг/м<sup>3</sup>);

$C$  – удельная теплоемкость жидкости (для воды в нормальном состоянии обычно принимается  $C = 1$  ккал/кг, где 1 ккал=4,19 кДж);

$t_{пр}$  и  $t_{обр}$  – измеренная температура прямой и обратной воды.

### 3.3 Экспериментальная установка

Схема стенда показана на рисунке 3.4.

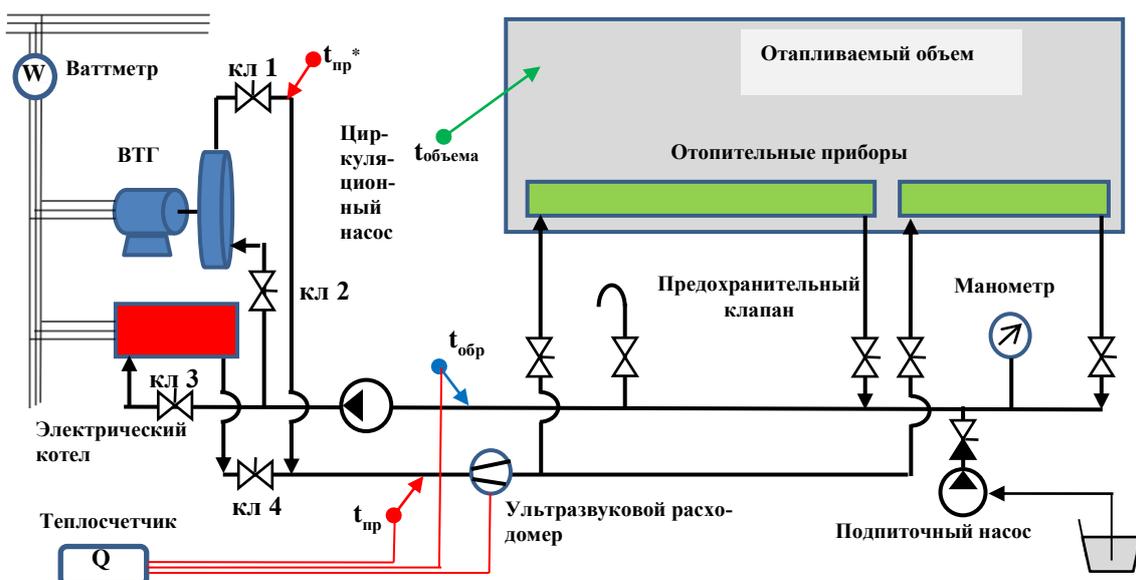


Рисунок 3.4. – Схема экспериментального стенда

Стенд состоит из электрического котла и вихревого теплогенератора (ВТГ), подключенных к двум навешенным на задней стенке тепловым коллекторам (батареям) отопления. На эти коллекторы надет съемный бокс размером 0,5x1x1 м. Объем воздуха в боксе обычно нагревается до температуры 40 °С. Электрический котел и ВТГ подключены к теплоприборам параллельно друг другу. При проведении опытов обеспечивается давление в системе  $P = 200$  кПа и температурный напор  $\Delta t = f(\tau)$ .

Целью исследований является определение количества теплоты, зафиксированное теплосчетчиком стенда, обеспечивавшее нагрев воздуха в боксе и затраченной на это электрической энергии тем и другим источником теплоты.

Принцип работы вихревого теплогенератора основан на выделении тепловой энергии трения воды при движении внутри кавитатора, а также при образовании и схлопывании многочисленных кавитационных пузырьков микроскопического размера. В качестве теплоносителя используется чистая вода или другие жидкости.

Конструкция ВТГ представлена на рисунке 3.5.

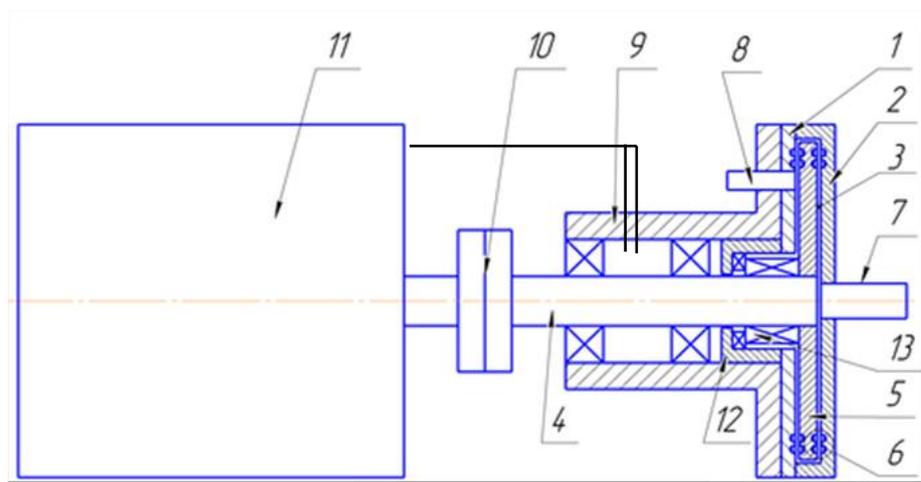


Рисунок 3.5. – Конструкция вихревого теплогенератора

Устройство для создания кавитационных процессов ВТГ содержит цилиндрический корпус 1, жестко связанную с ним крышку 2, цилиндрическую полость 3, внутри которой с небольшим зазором установлен диск 5, закрепленный на валу подшипникового узла 4.

На корпусе и крышке находятся глухие сверления 6 диаметром и глубиной 2–4 мм, расположенные по периферии в его торцах рядами

по окружности. Такие же глухие цилиндрические отверстия расположены и на диске ротора. Они противолежат идентичным глухим отверстиям на крышке и корпусе ВТГ (рисунок 3.6).

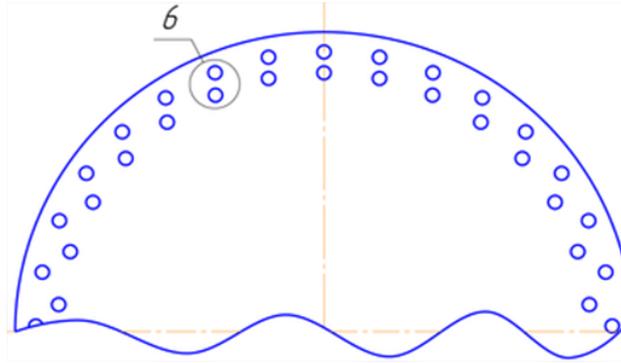


Рисунок 3.6. – Схема расположения глухих отверстий на диске и корпусе ВТГ

Отверстие входного канала 7 выполнено на крышке 2 ВТГ. Отверстие выходного канала 8 расположено на торцевой стенке корпуса ВТГ параллельно оси вращения вала 4. Вал зафиксирован в подшипниковом узле 9 и через соединительную муфту 10 соединен с электродвигателем 11. В корпусе 1 выполнено торцевое уплотнение вала 12 с резиновыми манжетами 13.

ВТГ работает следующим образом:

- нагреваемая жидкость подается в ВТГ через отверстие входного канала 7 со стороны крышки 2 к центру ротора 5 в щелевой зазор 3;
- под действием трения и центробежных сил жидкость движется между диском 5 и стенками корпуса к периферии диска в область глухих отверстий;
- в зонах глухих отверстий 6 возникает эффективное перемешивание жидкости, сопровождаемое образованием кавитационных каверн, что приводит к интенсивному кавитационному вспениванию, сопровождаемому быстрым нагревом жидкости;
- далее нагретая и вспененная жидкость под действием напора, создаваемого внешним циркуляционным насосом, подается в отверстие 8 выходного канала ВТГ и поступает в прямой трубопровод системы отопления.

ВТГ иногда декларируется, как высокоэффективный источник тепловой энергии с электрическим приводом, КПД которого может приближаться к 100%.

### 3.4 Проведение испытаний

#### 3.4.1 Подготовка установки к работе

Перед включением установки необходимо:

1. Поднять давление в системе до 200 кПа с помощью подпиточного насоса.
2. Через центральный рубильник стенда подать электроэнергию на стенд.

#### 3.4.2 Методика проведения эксперимента

1. Включить тумблер «режим управления котла» на «внутренний».
2. Проверить и, при необходимости, открыть все клапаны и вентили на тракте подачи теплоносителя от электрического котла к навешенным теплоприборам бокса согласно схеме.
3. Перекрыть клапанами кл. 1 и кл. 2 под электрическим котлом тракт подачи теплоносителя на ВТГ.
4. На лицевой панели электрического котла установить режим 60 °С.
5. По показанию расходомера убедиться в наличии движения теплоносителя с расходом  $\sim 0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ .
6. Выполнить 6 измерений теплового потока и электрической мощности с интервалом между измерениями 2–4 мин, результаты измерений занести в таблицу 3.1.
7. Выключить электрический котел, нажав и удерживая 4 с соответствующий знак на его лицевой панели.
8. Открыть клапаны кл. 1 и кл. 2 тракта подачи теплоносителя на ВТГ.
9. Включить насос протяжки теплоносителя через ВТГ.
10. Дождаться выравнивания температуры во всех точках измерения температуры стенда (не менее 30 мин, дождавшись разницы показаний термометров не более 0,5 °С).
11. Клапанами кл. 3 и кл. 4 под электрическим котлом перекрыть тракт электрического котла.
12. Включить ВТГ.
13. Проверить наличие показаний расхода на лицевой панели расходомера. Если показания отсутствуют отключить ВТГ и произвести удаление воздуха из системы в верхних точках. Повторно поднять давление до 200 кПа.

14. Выполнить 6 измерений теплового потока и электрической мощности с интервалом между измерениями 2 мин, результаты измерений занести в таблицу 3.2. При измерениях выполнять переключение на точку  $t_{np}^*$ , чтобы определить степень завышения значений теплосчетчика, вызванную нарушением сплошности потока за счет кавитационного «кипения» жидкости.

**ВНИМАНИЕ:** во избежание выхода из строя ВТГ работа его более 20 мин или подъем температуры теплоносителя свыше 70 °С **НЕ ДОПУСКАЕТСЯ!**

15. После завершения измерений отключить ВТГ.
16. Открыть клапаны кл. 3 и кл. 4.
17. После выравнивания температур снять давление в системе стенда.
18. Отключить электроэнергию.

### 3.5 Обработка результатов эксперимента

1. Выполнить расчет параметров в столбцах 7–9 таблицы 3.1 и столбцах 7–10 таблицы 3.2 по приведенным формулам.
2. Вычислить средние арифметические значения этих величин.
3. По бирке на корпусе электродвигателя ВТГ определить его КПД  $\eta_{эд}$ .
4. Определить реальный КПД ВТГ, как источника теплоты по формуле  $\eta_{ВТГ} = \eta / \eta_{эд}$ .
5. Используя формулу (3.9), вычислить реальные значения теплоемкости вспененной воды на выходе из ВТГ:

$$C_{всп}^* = 4,19 \frac{\bar{Q}}{Q^*}. \quad (3.9)$$

6. Сформулировать заключение о возможности использования упрощенных формул, аналогичных формуле (3.9), для расчета тепла в теплосчетчиках коммерческого назначения.

7. Сформулировать заключение о возможности использования ВТГ, как энергосберегающего устройства для выработки теплоты из электрической энергии.

Таблица 3.1. –Результаты измерений теплового потока электрического котла

№ опыта	$V$ – объемный расход воды, м <sup>3</sup> /ч	$Q$ – расход тепла на отопление, кДж/с	$N_{эл}$ – потребляемая электрическая мощность, Вт	$t_{пр}$ – температура прямой воды, град С	$t_{обр}$ – температура обратной воды, град С	$Q_{расч}=1,16V(t_{пр}-t_{обр})$ – расчетный расход тепла, кДж/с	$\delta=(Q-Q_{расч})/Q$ – погрешность расчета отпуски тепла	$\eta = 1000 * Q // N_{эл} * 100\%$ – КПД выработки тепла
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
2								
::								
6								
Средние значения –								

Таблица 3.2. – Результаты измерений теплового потока ВТГ

№ опыта	$V$ – объемный расход воды, м <sup>3</sup> /ч	$N_{эл}$ – потребляемая электрическая мощность, Вт	$t_{пр}$ – температура прямой воды, град С	$t_{пр}^*$ – температура прямой воды, град С	$t_{обр}$ – температура обратной воды, град С	$Q = 1,16V(t_{пр} - t_{обр})$ – расход тепла по контрольным точкам, кДж/с	$Q^* = 1,16V(t_{пр}^* - t_{обр})$ – расход тепла в точке выхода из ВТГ, кДж/с	$\eta = 1000 * Q // N_{эл} * 100\%$ – КПД выработки тепла	$\eta^* = 1000 * Q^* // N_{эл} * 100\%$ – формальный КПД выработки тепла
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									
2									
::									
6									
Средние значения –									

### 3.6 Контрольные вопросы

1. Какие конструкции расходомеров обычно применяются в промышленности и по какой причине?
2. Какие конструкции расходомеров, используемых для счетчиков тепла обычно применяют в жилом секторе?
3. Является ли расходомер-счетчик воды механического исполнения (с крыльчаткой) приемлемым для коммерческого учета в жилом секторе?
4. Почему расходомеры-счетчики горячей и холодной воды имеют различную расцветку (маркировку) – синюю для холодной воды и красную для горячей? Можно ли их поменять местами?
5. Какая точность расчетных формул для плотности и энтальпии допустима при использовании этих формул в коммерческих расчетах?
6. Как можно проверить правильность работы теплосчетчика в натуральных условиях (при эксплуатации)?
7. Почему объемный расход теплоносителя на объект, потребляющий тепло, всегда больше объемного расхода в обратном трубопроводе?
8. Почему расход смеси пара и конденсата невозможно измерить существующими расходомерами?
9. По какой причине величина теплового потока вспененной воды является завышенной?
10. На каких установках производятся метрологические испытания расходомеров?

## Лабораторная работа 4

### ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

#### 4.1 Цель работы

1. Изучение устройства, основных технических показателей и характеристик центробежного насоса.
2. Экспериментальное определение рабочих характеристик насоса.

#### 4.2 Краткие теоретические сведения

**Насосами** называются гидравлические машины, предназначенные для перекачивания жидкой среды. Поток жидкости создается в результате силового воздействия на жидкость в **проточной полости** или **рабочей камере** насоса.

По характеру силового воздействия на жидкость различают насосы **динамические** и **объемные**.

В **динамическом** насосе силовое воздействие на жидкость осуществляется в проточной полости, постоянно сообщаемой со входом и выходом насоса.

В **объемном** насосе силовое воздействие на жидкость происходит в рабочей камере, периодически изменяющей свой объем и попеременно сообщаемой со входом и выходом насоса.

Динамические насосы не обладают **свойством герметичности**. При неподвижном рабочем колесе, которое устанавливается в проточной полости (т.е. при неработающем насосе), жидкость практически беспрепятственно может перетекать со входа на выход и наоборот, с выхода на вход. Из-за негерметичности динамические насосы не способны развивать высокие давления. Но в связи с тем, что проточная полость у этих насосов постоянно сообщена со входом и выходом и жидкость подается непрерывным потоком, динамические насосы имеют (по сравнению с объемными) более высокие подачи (расходы). Также из-за негерметичности динамические насосы (если они не снабжены специальными устройствами) не обладают **свойством самовсасывания**. Это значит, что если насос установлен выше уровня жидкости в баке, из которого она засасывается, то в начальный момент, когда всасывающий трубопровод и насос заполнены воздухом, насос не способен создать разрежение, достаточное для

подъема жидкости, и начать работу. В связи с этим перед включением динамический насос необходимо заливать жидкостью и удалять из него воздух.

Объемные насосы обладают свойствами герметичности, самовсасывания, **способны создавать высокие давления**. Говорят, что если вытеснитель в рабочей камере имеет идеальное уплотнение, то такой насос способен создавать сколь угодно высокое давление. Но в связи с тем, что объемный насос постоянно работает в режиме переключения камер (каждая камера периодически подключается то к всасыванию, то к выходу насоса), он имеет по сравнению с динамическим насосом **невысокую подачу**.

Таким образом, динамические насосы способны обеспечивать высокие подачи при относительно невысоких давлениях. Объемные насосы, наоборот, обеспечивают высокие давления при относительно невысоких подачах.

Объемные насосы наибольшее применение находят в машиностроительных гидроприводах.

При решении задач тепло- и водоснабжения применяются динамические насосы.

К динамическим насосам относятся лопастные насосы, электромагнитные и насосы трения.

Лопастные насосы бывают двух типов: центробежные и осевые.

К насосам трения относятся вихревые, шнековые, дисковые, струйные насосы и др.

В области тепло- и водоснабжения используются центробежные насосы.

В центробежном насосе жидкость под действием центробежных сил перемещается через рабочее колесо от центра к периферии. Жидкость, отбрасываемая лопатками колеса, поступает в спиральный отвод и далее в напорный трубопровод. Спиральный отвод предназначен не только для улавливания жидкости, выходящей из рабочего колеса, но и для частичного преобразования ее кинетической энергии в потенциальную энергию давления.

Конструкция спирального отвода полностью определяет расчетный режим работы центробежного насоса. Отклонение подачи в ту или иную сторону от расчетного переводит режим работы спирального отвода либо в режим конфузора (при  $Q > Q_p$ ), в котором жидкость двигается с ускорением, или диффузора (при  $Q < Q_p$ ), в котором жидкость движется с замедле-

нием, также гидродинамическим следом обтекания языка спирального отвода ( $Q \approx Q_p$ ) приводит к периодическому изменению относительной скорости ядра потока в каналах рабочего колеса. Все это существенно сказывается на КПД насоса.

Центробежные насосы классифицируют по следующим основным признакам:

1) по направлению оси расположения, вращения или движения рабочих органов: **горизонтальный, вертикальный;**

2) по расположению рабочих органов и конструкций опор: **консольный, моноблочный, с выносными опорами, с внутренними опорами;**

3) по расположению входа в насос: **с боковым входом, с осевым входом, двустороннего входа;**

4) по числу ступеней и потоков: **одноступенчатый, двухступенчатый, многоступенчатый, однопоточный, двухпоточный, многопоточный.**

На рисунке 4.1 показан в разрезе центробежный насос (горизонтальный, консольного типа, с осевым входом, одноступенчатый, однопоточный).

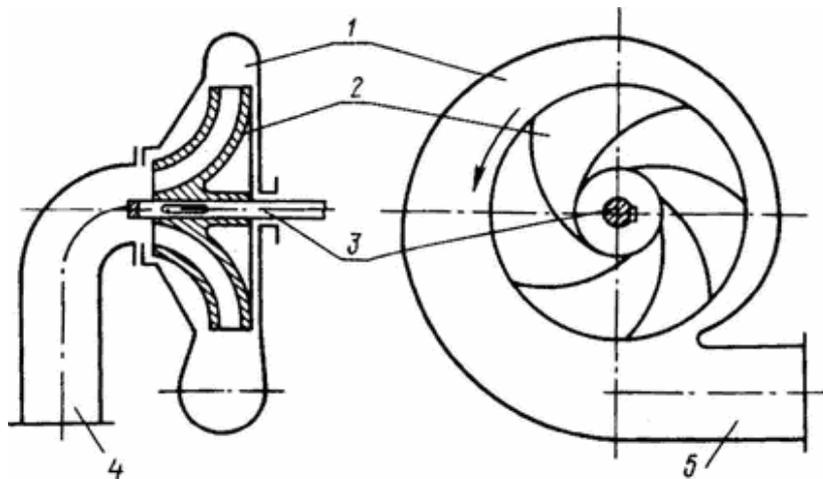


Рисунок 4.1. – Схема центробежного насоса

Корпус насоса 1 выполнен в виде спирального отвода жидкости. Ротор состоит из рабочего колеса 2 с лопастями, жестко закрепленного на консольной части вала 3 электродвигателя. К корпусу примыкают два патрубка: всасывающий 4 и нагнетательный 5.

Улиткообразная форма отвода обусловлена увеличением количества жидкости, поступающей из рабочего колеса насоса и требующей постоянного расширения его проходного сечения.

При вращении рабочего колеса жидкости сообщается вращательное и радиально-поступательное движение от центра к периферии вследствие действия центробежных сил. При этом в центре насоса создается разрежение, благодаря чему обеспечивается непрерывное поступление жидкости через всасывающий патрубок к центру насоса. Жидкость, пройдя по лопастям насоса, отбрасывается с рабочего колеса в направляющий аппарат, представляющий собой спиральный расширяющийся канал. Здесь часть кинетической энергии, сообщенная жидкости в колесе, преобразуется в гидродинамическое давление. Под воздействием последнего жидкость через нагнетательный патрубок отводится в соответствующий трубопровод.

Напор и подача изменяются в центробежном насосе одновременно при увеличении радиуса или частоты вращения. При этом повышаются окружные скорости лопастей  $u = r\omega$ . Их возрастание ограничивается условиями прочности материала колес. Предельные значения окружных скоростей: для чугунных колес (литье) – 40, для стальных – 300—500, для бронзовых – 80 м/с.

Указанные ограничения определяют сравнительно небольшие напоры, создаваемые в центробежных насосах. Для получения более высоких напоров применяют многоступенчатые насосы, в которых несколько рабочих колес установлено на одном валу в общем корпусе и поток жидкости проходит последовательно через все колеса. Напор, создаваемый при таком соединении колес, равен сумме напоров отдельных ступеней – колес. При этом подача сохраняется постоянной, т.е. равной подаче одноступенчатого колеса.

Работа насоса характеризуется следующими основными параметрами: подачей, напором, давлением, мощностью, КПД и частотой вращения.

**Подачей насоса  $Q$  (м<sup>3</sup>/с)** называется объем жидкости, проходящей в единицу времени через напорный (выходной) патрубок.

Подача насоса зависит от геометрических размеров проточной полости и рабочего органа и скорости его движения, а также от утечек жидкости внутри насоса между областями нагнетания и всасывания.

**Напором насоса  $H$  (м вод. ст.)** называется удельная (приходящаяся на единицу веса) энергия, приобретаемая жидкостью при прохождении через насос:

$$H = H_H - H_B, \quad (4.1)$$

где  $H_H$  – напор на выходе (в напорном патрубке) насоса;

$H_B$  – напор на входе насоса.

Учитывая, что напор в любом сечении трубопровода равен сумме геометрического  $z$ , пьезометрического  $\frac{p}{\rho \cdot g}$  и скоростного  $\frac{\alpha \cdot V^2}{2 \cdot g}$  напоров ( $p$  – давление;  $V$  – средняя скорость жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса), можно записать:

$$H = (z_H - z_B) + \frac{p_H - p_B}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_H \cdot V_H^2 - \alpha_B \cdot V_B^2}{2 \cdot g}. \quad (4.2)$$

Индекс « $H$ » относится к напорному патрубку (выходу насоса), « $B$ » – к входному.

Для условий лабораторного стенда разностью уровней  $z$  можно пренебречь. Сечение подводящего и отводящего трубопроводов также не изменяются, поэтому и изменение скоростного напора не происходит. А поскольку избыточное давление на входе в насос  $P_в$  равно нулю, то расчетная формула (4.2) существенно упрощается:

$$H = \frac{p_H}{\rho \cdot g}. \quad (4.3)$$

**Давление насоса  $p$**  определяется из выражения

$$p_H = p = \rho \cdot g \cdot H. \quad (4.4)$$

**Мощностью насоса  $N$**  называется мощность, потребляемая насосом от приводного электродвигателя:

$$N = M \cdot \omega, \quad (4.5)$$

где  $M$  – крутящий момент на валу электродвигателя насоса;  
 $\omega$  – угловая скорость вала насоса.

Потребляемая мощность насоса определяется по ваттметру, установленному в системе подачи электроэнергии на приводной электродвигатель.

**Полезной мощностью насоса  $N_{п}$**  называется мощность, приобретаемая жидкостью при прохождении ею через насос:

$$N_{п} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H = Q \cdot p. \quad (4.6)$$

Отношение полезной мощности  $N_{п}$  к мощности насоса  $N$  называется **коэффициентом полезного действия (КПД) насоса:**

$$\eta = \frac{N_{п}}{N}. \quad (4.7)$$

При проектировании насосных установок необходимо знать рабочие характеристики насоса, чтобы обеспечить работу насоса в области максимальных значений КПД.

**Рабочие характеристики** центробежного насоса – это зависимости  $p = f_1(Q)$ ,  $N = f_2(Q)$  и  $\eta = f_3(Q)$ .

Получают рабочие характеристики при постоянной частоте вращения вала насоса. Зависимость  $H = f_1(Q)$  называют **главной характеристикой**.

Рабочие характеристики насоса, полученные при номинальной частоте вращения, называют **внешними**.

Проводя испытания насоса при различных частотах вращения вала насоса получают **универсальную характеристику** насоса, представляющую собой семейство зависимостей  $H = f(Q)$ , построенных при постоянных значениях КПД. Знание универсальной характеристики насоса особенно важно в тех случаях, когда привод насоса осуществляется от двигателя, имеющего переменную частоту вращения, например, электродвигателя с частотным регулированием.

Для определения всасывающей способности насоса и условия возникновения кавитации проводят кавитационные испытания и строят **кавитационные характеристики** – зависимости  $H = f_1(H_v)$ ,  $Q = f_2(H_v)$  и  $\eta = f_3(H_v)$ , где  $H_v$  – вакуумметрическая высота всасывания насоса.

Кавитационные характеристики определяют (как и рабочие) при постоянной частоте вращения вала насоса. Вакуумметрическая высота всасывания  $H_v = p_{\text{ВАК}} / (\rho \cdot g)$ , где  $p_{\text{ВАК}}$  – вакуумметрическое давление на входе насоса.

### 4.3. Экспериментальная установка

**Объектом испытаний** является центробежный насос ЦН.

Насос перекачивает жидкость из нижнего бака в верхний (рисунок 4.2), откуда вода самотеком возвращается в нижний бак.

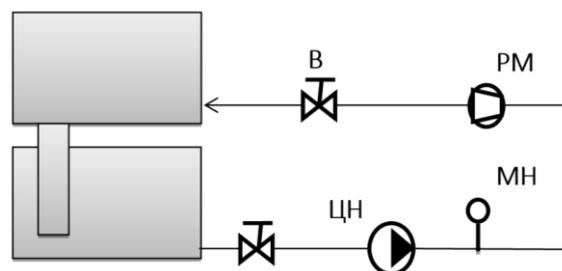


Рисунок 4.2. – Схема стенда

Расход насоса регулируется клапаном В и измеряется расходомером РМ.

## 4.4 Проведение испытаний

### 4.4.1. Подготовка установки к работе

Перед включением установки необходимо:

1. С помощью перемычек со штекерами обеспечить схему электрических соединений в соответствии с рисунком 4.3 (на передней панели модуля электрического управления).
2. На модуле гидравлического управления закрыть вентили В3, В4 и В5 (закрытие вентиля осуществляется путем вращения маховика управления по часовой стрелке); вентиль В2 необходимо открыть (при управлении вентилями рекомендуется не прикладывать больших усилий);
3. Открыть вентиль В6 (в открытом положении рукоятка управления параллельна оси трубопровода).

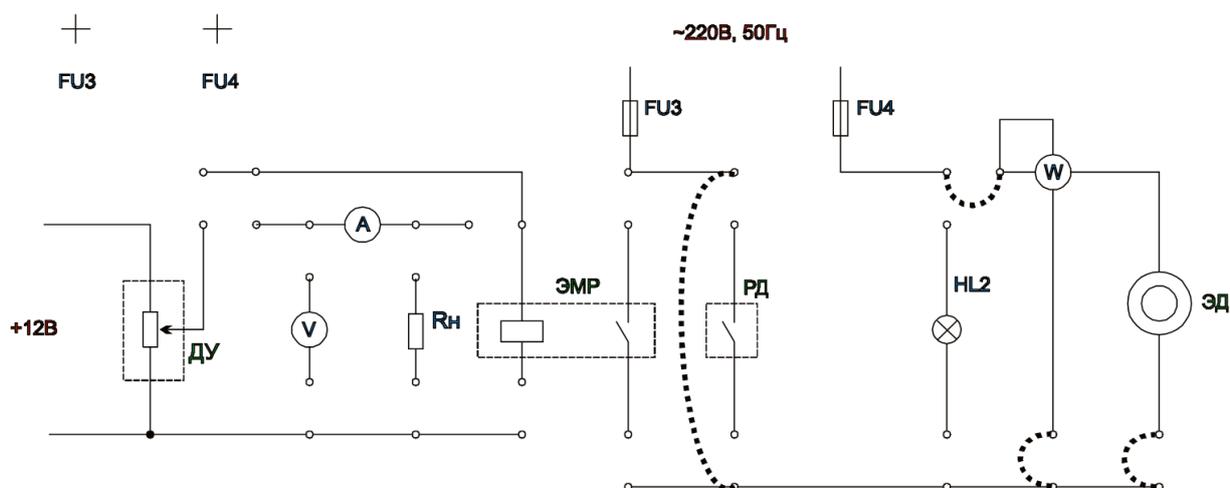


Рисунок 4.3. – Схема электрических соединений

### 4.4.2 Методика проведения эксперимента

Для проведения испытаний необходимо:

1. Включить электрическое питание стенда. Для этого тумблер «СЕТЬ» на модуле электрического управления необходимо установить в верхнее положение.
2. Вначале, закрывая вентиль В, необходимо определить максимальное давление, которое развивает насос (по манометру МН).

**ВНИМАНИЕ:** для предотвращения преждевременного выхода из строя насоса запрещается продолжительное время (более 30 с) работать при максимальных давлениях, т.к. в этом случае может не быть протока воды через насос (это видно по расходомеру, стрелка которого в этом случае не движется).

Отсутствие протока воды приводит к большим динамическим радиальным усилиям на консоли рабочего колеса насоса, появлению протечек воды в уплотнении и выходе из строя подшипника электродвигателя.

3. Затем, разбив диапазон изменения давления насоса на 6 интервалов, провести 7 опытов, как показано в таблице 4.1.

В каждом опыте давление должно быть постоянным.

4. Первый опыт следует начать с минимального давления насоса (т.е. при минимальном сопротивлении сети, на которую работает насос) при полностью открытом вентиле В.

5. В каждом опыте необходимо измерять:

- давление на выходе насоса  $p_H$  (по манометру МН);
- время  $t$  прохождения через расходомер РМ заданного постоянного объема воды  $W$  (объемом  $W$  необходимо задаваться, принимая, например,  $W = 0,01 \text{ м}^3$  ( $10 \text{ дм}^3$ );
- мощность  $N_{Эл}$ , подводимую к электродвигателю – по ваттметру (при определении мощности показание ваттметра необходимо умножить на 20, тогда мощность будем получать в ваттах).

6. Результаты измерений необходимо занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1. –Результаты испытаний ЦН

№ опыта	$p_H$ – Давление на выходе насоса, $1 \text{ кгс/см}^2 = 10^5 \text{ Па}$	$W$ – объем воды, Проходящей через расходомер, $1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3$	$t$ – время прохождения объема $W$ , с	$N_{Эл} \cdot 20$ – мощность на входе электродвигателя, Вт	$Q$ – подача насоса, $W/t \text{ м}^3/\text{с}$	$H$ – напор насоса, $p_H / (\rho g) \text{ м}$	$N_{П}$ – полезная мощность насоса, $p_H \cdot Q \text{ Вт}$	$\eta$ – КПД насоса $N_{П} / N_{Эл}$
1	$0,03 \cdot 10^6$	0,01						
2	$0,10 \cdot 10^6$	0,01						
3	$0,20 \cdot 10^6$	0,01						
4	$0,30 \cdot 10^6$	0,01						
5	$0,40 \cdot 10^6$	0,01						
6	$0,50 \cdot 10^6$	0,01			0		0	
7	$0,58 \cdot 10^6$	0	–		0		0	0

#### 4.4.3 Обработка результатов эксперимента.

1. Выполнить расчет параметров в столбцах 6–10 таблицы по приведенным формулам.
2. Построить рабочие характеристики насоса **на одном** графике:

$$H = f_1(Q), \quad N = f_2(Q) \text{ и } \eta = f_3(Q).$$

3. Показать на графике рабочую зону расходов и напора исследуемого насоса. Рабочей зоной расходов считается зона  $\pm 30\%$  от расхода с максимальным КПД.
4. Определить по границам рабочей зоны расходов рабочую зону напоров, развиваемых центробежным насосом. Показать эту зону на графиках характеристик.
5. Сформулировать заключение о пределах пригодности данного насоса для использования его в системах автоматизации теплоснабжения в зданиях и сооружениях высотой 20 и 40 м (для открытых и закрытых систем).

#### 4.5 Контрольные вопросы

1. Назначение центробежного насоса в системах автоматического управления и регулирования.
2. Основные параметры ЦН.
3. Что такое «универсальная характеристика» центробежного насоса?
4. Почему теоретический напор центробежного насоса всегда больше реального?
5. Какие потери мощности приводят к снижению КПД ЦН?
6. Почему напор центробежного насоса обычно определяют в метрах водяного столба?
7. Почему в циркуляционных системах величина напора ЦН не является определяющей?
8. Что относится к кавитационным характеристикам ЦН?
9. Какие параметры входят в формулу для расчета напора центробежного насоса?
10. Какие конструкции насосов динамического типа кроме центробежных Вы знаете?

## Лабораторная работа 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА В ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

#### 5.1 Цель работы

1. Изучение основных методов регулирования расхода теплоносителя в циркуляционных системах: традиционного с изменением гидравлического сопротивления тракта и современного – с изменением частоты вращения циркуляционного насоса, используемых в АСУ ТП;
2. Экспериментальное исследование методов регулирования расхода на циркуляционном стенде.
3. Сравнение технико-экономических параметров этих методов.

#### 5.2 Краткие теоретические сведения

Циркуляционная система – это, как правило, гидравлический тракт, который имеет небольшое собственное гидравлическое сопротивление, служащий для передачи тепловой энергии жидким теплоносителем.

Для изменения расхода жидкости в циркуляционных системах обычно используются два метода: искусственное изменение гидравлического сопротивления тракта с помощью регулирующих клапанов или изменение частоты вращения привода насоса, перекачивающего жидкость.

##### 5.2.1 Метод изменения гидравлического сопротивления.

На рисунке 5.1 показан график  $H-Q$  характеристики центробежного насоса. Изменение расхода в системе обеспечивается за счет изменения коэффициента гидравлического сопротивления клапана.

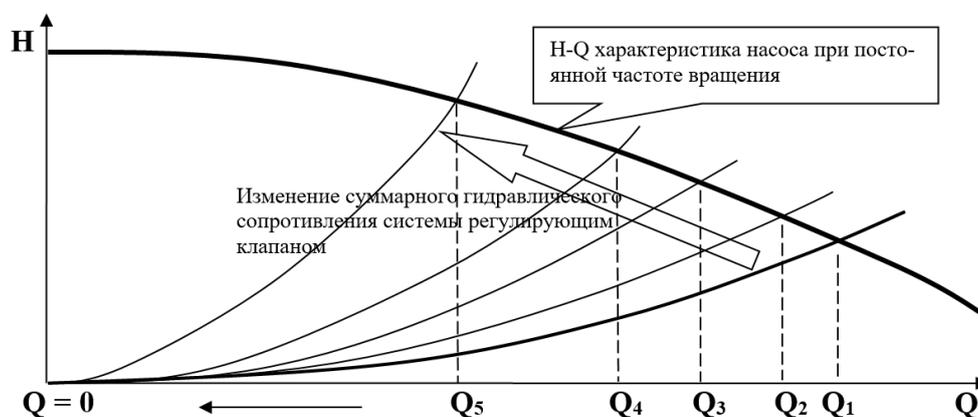


Рисунок 5.1. – Изменение расхода в системе дроссельным клапаном

### 5.2.2 Метод изменения частоты вращения насоса

На рисунке 5.2 показаны графики  $H-Q$  характеристик центробежного насоса при неизменном суммарном гидравлическом сопротивлении циркуляционной системы.

Изменение расхода в системе обеспечивается только за счет изменения расходно-напорной характеристики самого насоса.



Рисунок 5.2. – Изменение расхода в системе за счет изменения частоты вращения приводного электродвигателя насоса

Основным параметром, определяющим эффективность работы циркуляционной системы будет не КПД насоса, а затраты энергии на перекачку жидкости при регулировании ее расхода тем или иным способом.

Его оценивают удельным расходом электроэнергии на перекачку единицы объема или массы жидкости в циркуляционной системе.

### 5.3 Экспериментальная установка

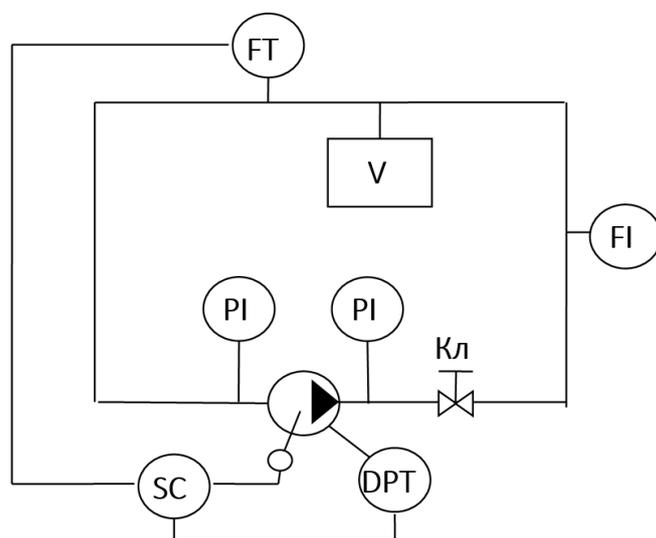
Стенд предназначен для проведения экспериментальных исследований двух основных способов регулирования расхода, применяемых в настоящее время:

- изменение расхода регулирующим дроссельным клапаном;
- изменение расхода с использованием регулятора частоты вращения приводного асинхронного 3-фазного электродвигателя центробежного насоса.

Кроме того, на стенде имеется возможность проводить исследования различных законов регулирования частоты вращения: П-, ПИ- и ПИД-законов.

На стенде предусмотрена возможность разработки алгоритмов регулирования работы насоса с использованием статических давлений в спиральном отводе при изменении его геометрических характеристик.

Схема стенда представлена на рисунке 5.3.



FI – ротаметр; FT – расходомер с импульсным выходным сигналом; PI – манометры; SC – частотный регулятор; DPT – датчик перепада давления с дистанционной передачей сигнала; V – компенсатор объема; Кл – регулирующий дроссельный клапан

Рисунок 5.3. – Общая схема стенда

При проведении опытов обеспечивается давление в системе  $P = 200$  кПа.

Для исключения пузырьков воздуха в системе и нормальной работы ротаметра перед испытаниями выполнить сброс воздуха в верхних точках стенда через соответствующие клапана продувки (на схеме не показаны).

## 5.4 Проведение испытаний

### 5.4.1 Подготовка установки к работе

Перед включением установки необходимо:

1. Поднять давление в системе до 200 кПа с помощью подпиточного насоса.
2. Включить центральный рубильник стенда – подать электроэнергию на стенд.

3. Включить регулятор частоты на 50 Гц и полностью открыть регулирующий клапан;

4. Несколько раз сбросить воздух и компенсировать давление подпиточным насосом до полного исчезновения пузырьков воздуха над поплавком ротаметра.

#### 5.4.2 Методика проведения экспериментов

После завершения подготовительных операций необходимо активировать регулятор частоты зеленой кнопкой и вывести задатчик регулятора на частоту 50 Гц.

##### Регулирование расхода дроссельным клапаном

1. Поворачивая привод регулирующего клапана добиться всплытия поплавка ротаметра верхней плоскостью до отметки «1м<sup>3</sup>/ч».

2. Снять показания ваттметра и занести их в таблицу 5.1.

3. Повторить действия по п. 1 и 2 для всех значений расхода, указанных в таблице 5.1.

Таблица 5.1. – Результаты испытаний

Q [м <sup>3</sup> /ч]	Дроссельное регулирование		Частотное регулирование	
	N <sub>э</sub> [Вт]	N <sub>э</sub> /Q [Вт/м <sup>3</sup> в ч]	N <sub>э</sub> [Вт]	N <sub>э</sub> /Q [Вт/м <sup>3</sup> в ч]
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
10,6				

##### Регулирование расхода изменением частоты вращения

1. Полностью открыть регулирующий клапан.

2. Поворачивая ручку задатчика регулятора частоты вращения, добиться всплытия поплавка ротаметра верхней плоскостью до отметки «1м<sup>3</sup>/ч».

3. Снять показания ваттметра и занести их в таблицу 5.1.
4. Повторить действия по п. 1 и 2 для всех значений расхода, указанных в таблице 5.1.

### 5.4.3 Завершение испытаний

1. Перевести задатчик частоты в положение 0 Гц и нажать красную кнопку.
2. Дождаться остановки вентилятора охлаждения регулятора частоты и отключить электропитание стенда.
3. Снять давление в циркуляционной системе стенда.

## 5.5 Обработка результатов экспериментов

1. Выполнить расчет удельного расхода электроэнергии на перекачку жидкости на всех режимах для обоих методов регулирования расхода.
2. На одном графике построить функции  $N_э/Q = f(Q)$  для различных методов регулирования.
3. Определить среднее по диапазону расходов значение  $N_э/Q$  для обоих методов регулирования по формуле (5.1)

$$\overline{N_э/Q} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{N_э}{Q} \right)_i}{n}. \quad (5.1)$$

4. Отметить на графике зону полученного экономического эффекта.
5. В выводах указать в качестве технико-экономического эффекта соотношение между величинами усредненного удельного расхода электроэнергии на перекачку жидкости, полученными в п. 3.

## 5.6 Контрольные вопросы

1. Какой параметр является основным для оценки эффективности работы циркуляционной системы?
2. Почему в циркуляционных системах КПД насоса не является определяющей величиной?
3. Как осуществляется выбор насосов для применения их в циркуляционных системах?

4. Какой из рассмотренных методов регулирования расхода является наиболее перспективным и почему он редко использовался до настоящего времени?
5. Какие отрицательные эффекты иногда наблюдаются при использовании частотных регуляторов?
6. Можно ли полностью отказаться от дроссельного метода регулирования расхода?
7. Можно ли использовать частотный метод для регулирования напора в гидравлических системах?
8. Что такое ротаметр? Принцип его работы.

## Лабораторная работа 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПО УРОВНЮ

### 6.1 Цель работы

1. Изучение схемы релейной позиционной системы автоматического управления.
2. Экспериментальные исследования характеристик САУ с регулированием по уровню.

### 6.2 Краткие теоретические сведения

**Системой автоматического управления (САУ)** называют совокупность взаимодействующих в процессе работы элементов, предназначенных для поддержания значения регулируемой величины (уровня) в заданных пределах.

Автоматическое регулирование является разновидностью автоматического управления.

На рисунке 6.1 представлена функциональная схема САУ с регулированием по уровню. САУ состоит из объекта управления ОУ и регулятора Р.

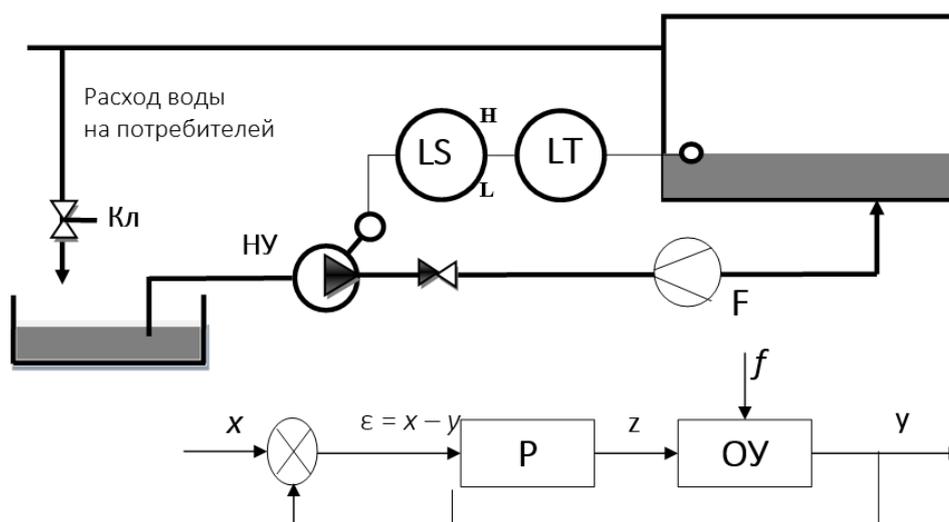


Рисунок 6.1. – Функциональная схема САУ

Все воздействия, приложенные к элементам системы, можно разделить на **внешние и внутренние**.

Внешние воздействия, в свою очередь, делятся на **возмущающие**  $f$  и **задающие**  $x$ . Возмущающие воздействия приложены к объекту регулирования ОР. Внешние воздействия на САУ часто называют **входными величинами**.

Величину, по которой осуществляется управление, называют **регулируемой** или **выходной** величиной (обозначена на рисунке 1 буквой « $y$ »).

Воздействия, передаваемые от одного элемента системы к другому, являются **внутренними воздействиями** системы. Примером внутреннего воздействия в системе на рисунке 6.1 является управляющее воздействие  $z$ , вырабатываемое регулятором  $P$  под влиянием задающего воздействия  $x$  и регулируемой величины  $y$ .

Если к системе приложена одна входная величина, а регулирование осуществляется по одной выходной (регулируемой) величине, то такую САУ называют **одноконтурной**.

В приведенной схеме САУ реализуется принцип регулирования по отклонению, так как алгоритм регулирования формируется в зависимости от отклонения регулируемой величины  $y$  относительно заданного ее значения  $x$ . Управляющее воздействие формируется только при условии  $\Delta = x - y \neq 0$ , т.е. при возникновении отклонения  $\Delta$ .

Для этого случая можно записать

$$z = f(x - y) \begin{cases} z_{\text{выкл}} \leq \Delta_{\text{min}} \\ z_{\text{выкл}} \geq \Delta_{\text{max}} \end{cases} \quad (6.1)$$

Для измерения отклонения  $\Delta$  и формирования управляющего воздействия  $u$  в схему (см. рисунок 6.1) введена **обратная связь**.

Если в обратную связь включен регулятор (как это имеет место в рассматриваемом случае), то такую обратную связь называют **главной**.

В рассматриваемой САУ обратная связь является **отрицательной**, поскольку, как видно из формулы (6.1), регулируемая величина  $y$  и управляющее воздействие  $z$  – величины, противоположные по знаку.

Преимуществом принципа регулирования по отклонению является то, что управляющее воздействие формируется независимо от того, какая причина вызвала отклонение регулируемой величины. В этом случае нет необходимости анализировать возмущающие воздействия и выяснять, какое из них привело к отклонению.

Недостатком регулирования по отклонению заключается в том, что управляющее воздействие формируется только после того, как возникнет ошибка  $\Delta = x - y$  в выполнении заданного алгоритма функционирования системы.

### 6.3 Экспериментальная установка

**Объектом исследования** в данной лабораторной работе является САУ с регулированием по уровню, показанная на рисунке 6.1.

**Объектом управления (ОУ)** является верхний гидробак стенда Б2, который имитирует водонапорную башню.

При открытии поворотного крана В6 вода начинает перетекать из верхнего бака Б2 в нижний Б1, тем самым имитируется забор воды из водонапорной башни потребителями.

Расход воды из верхнего бака является **возмущающим воздействием (z)**, которое приводит к отклонению **регулируемой величины (y)** – уровня воды в баке. Расход воды на потребителей осуществляется самотеком под действием гидростатического давления.

Процесс подачи воды в верхний бак выполняется насосной установкой.

Применение в обратной связи (см. рисунок 6.1) объекта управления (ОУ) регулятора (Р) позволяет автоматизировать процесс управления объектом.

В состав регулятора входят потенциометрический датчик уровня поплавкового типа (ДУ), установленный в верхнем баке и электромагнитное реле (ЭМР). Характеристики этих элементов САУ были исследованы в предыдущих лабораторных работах.

**Управляющее воздействие  $u$**  представляет собой электрический сигнал, подаваемый на электродвигатель насосной установки после срабатывания электромагнитного реле.

### 6.4 Проведение испытаний

#### 6.4.1 Подготовка установки к работе

1. С помощью перемычек собрать схему электрических соединений в соответствии с рисунком 6.2 (на передней панели модуля электрического управления).

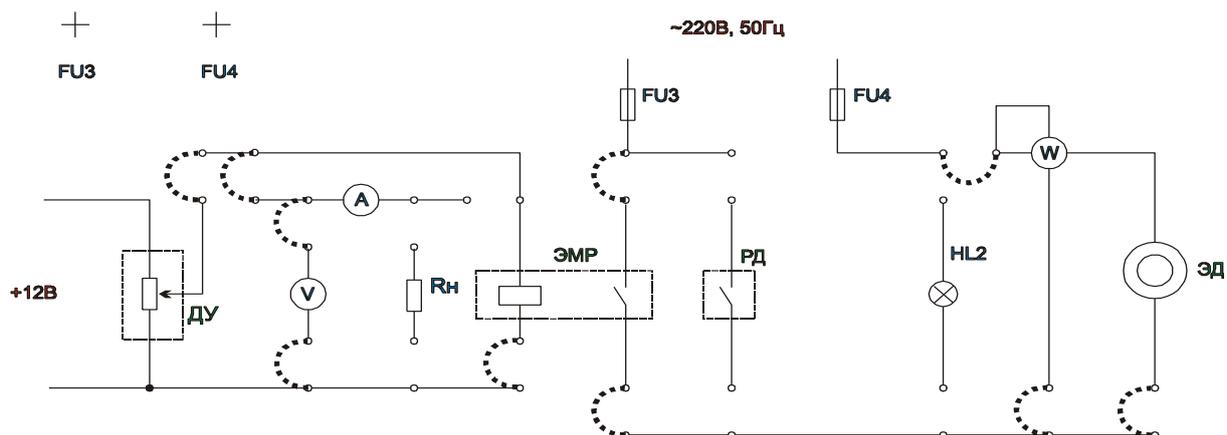


Рисунок 6.2. – Схема электрических соединений

2. Закрыть вентили В3, В4 и В5. Вентиль В2 открыть, при этом при работе насоса вода из нижнего бака будет подаваться в верхний бак через расходомер РА.

3. Включить на модуле электрического управления питание электронного секундомера (нажать кнопку ВКЛ).

#### 6.4.2 Методика проведения испытаний

Провести три опыта при различных степенях открытия крана В6 (0°, 35° и 45° к оси трубы). Этим имитируется различный расход воды на потребителей.

В первом опыте кран В6 открыть полностью (при этом рукоятку управления краном необходимо установить параллельно оси трубопровода).

1. Включить секундомер и одновременно включить электрическое питание стенда. При этом насосная установка начнет подавать воду в верхний бак и в дальнейшем будет работать в автоматическом режиме.

2. В процессе проведения испытаний через каждые 20 с снимать и заносить в таблицу 6.1 показания уровня в верхнем баке по водомерному стеклу для построения графика изменения регулируемого параметра (циклограммы САУ).

3. В графе время указывать моменты остановки и включения двигателя центробежного насоса.

4. После завершения опыта дождаться слива воды и повернуть рукоятку крана В6 на угол 35° (или 45°), что будет соответствовать уменьшению забора воды

Таблица 6.1. – Результаты испытаний

Опыт 1 (кл. В6 0°)		Опыт 2 (кл. В6 35°)		Опыт 3 (кл. В6 45°)	
время	уровень	время	уровень	время	уровень
0	0	0	0	0	0
20		20		20	
40		40		40	
60		60		60	
80		80		80	
100		100		100	
120		120		120	
140		140		140	
160		160		160	
180		180		180	
200		200		200	
220		220		220	
240		240		240	
260		260		260	
280		280		280	
300		300		300	
320		320		320	
340		340		340	
360		360		360	
380		380		380	
400		400		400	
420		420		420	
440		440		440	
460		460		460	
480		480		480	
500		500		500	
520		520		520	
540		540		540	
560		560		560	
580		580		580	
600		600		600	

5. Повторить измерения по пунктам 1, 2 и 3.

6. После проведения трех опытов отключить электрическое питание стенда и снять перемычки со штекерами с модуля электрического управления.

### 6.4.3 Обработка результатов эксперимента.

1. По результатам измерений построить графические зависимости (циклограммы):

1.  $h = f(t)$  при открытии клапана В6 на  $0^\circ$ .
2.  $h = f(t)$  при открытии клапана В6 на  $35^\circ$ .
3.  $h = f(t)$  при открытии клапана В6 на  $45^\circ$ .

2. Под каждым графиком циклограммы в том же масштабе времени дать диаграмму включения–отключения электродвигателя насоса.

3. В выводах показать максимальный объем жидкости и отметить характер изменения циклограммы при уменьшении расхода на потребителей.

### 6.5 Контрольные вопросы

1. Преимущества, назначение и структура систем автоматического регулирования.

2. В чем достоинства и недостатки принципа регулирования по отклонению?

3. Что представляют собой объект регулирования и регулятор в исследуемой САР?

4. Какие возмущающие и управляющие воздействия действуют на САР? По какому параметру осуществляется регулирование?

5. Поясните методику экспериментальных исследований САР.

6. Как зависит энергия, потребляемая САР, от расхода воды?

**Лабораторная работа 7**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ**  
**АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПО ДАВЛЕНИЮ**

**7.1 Цель работы:**

1. Изучение релейной системы автоматического управления, используемой в водоснабжении, с регулирования по давлению.
2. Экспериментальное исследование характеристик САУ.

**7.2 Краткие теоретические сведения**

Системы автоматического управления с регулированием по уровню в водоснабжении применяются в основном в сельской местности. Основным отличительным признаком такого типа систем является наличие водонапорной башни или резервуара.

САУ с регулированием по давлению находят применение, в основном, в городах. В этом случае резервуары с водой не возвышаются над зданиями, как это имеет место в САУ с регулированием по уровню, а, как правило, их располагают ниже уровня поверхности земли.

Для создания избыточного давления в резервуарах используются компрессоры, с помощью которых воздух нагнетается в резервуары с водой и выдавливает ее в систему водоснабжения. Либо наоборот: воздух, закачанный под небольшим давлением заполняет промежуточную полость между резиновым мешком и стенками бака, а вода центробежным насосом подается непосредственно в резиновый мешок до предельного верхнего давления, соответствующего срабатыванию позиционного реле, отключающего подачу электроэнергии на приводной электродвигатель насоса.

При снижении давления до нижнего значения при опорожнении емкости реле электродвигателя включается и насос возобновляет подачу воды в емкость.

Датчики давления, имеющие вторичные преобразователи контактного типа, по сути, являются **реле давления**.

Под реле давления обычно понимают устройства, выдающие информацию или в виде механического перемещения выходного звена, или в виде электрического сигнала при достижении в гидролинии заданного давления. Обычно реле давления выполняют в виде устройства, содержа-

щего миниатюрный гидродвигатель с поступательным движением ведомого звена (гидроцилиндр, мембрана или сильфон), который в одну сторону перемещается под действием давления жидкости или газа, а в другую возвращается под действием возвратной пружины. Ведомое звено гидродвигателя очень часто управляет электрическими контактами.

На рисунке 7.1 показана схема реле давления, используемого на стенде для управления электродвигателем насосной установки.

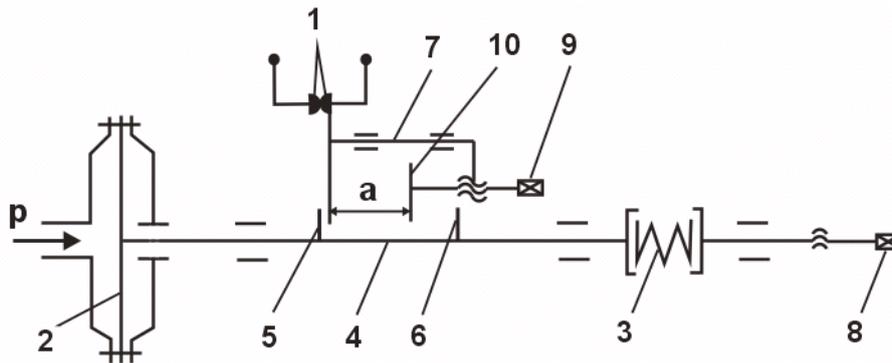


Рисунок 7.1. – Схема реле давления

Реле давления имеет постоянно замкнутые контакты 1. При увеличении давления  $p$  до давления, равного верхнему порогу срабатывания  $p_{верх}$ , диафрагма 2 перемещается вправо, сжимая пружину 3, и размыкает контакты 1, установленные в цепи управления электродвигателем, что приводит к отключению насосной установки. Воздействие от диафрагмы на пружину 3 и контакты 1 передается через толкатель 4 и упор 5, закрепленный на толкателе.

При уменьшении давления  $p$  диафрагма 2 с толкателем 4 под действием пружины 3 перемещаются влево, однако это не приводит к замыканию контактов 1 до тех пор, пока давление  $p$  не достигнет нижнего значения  $p_{ниж}$  (при этом упор 6, воздействуя на верхнюю рычажную систему 7, замкнет контакты 1, что приведет к включению насосной установки).

При воздействии на винт 8 и изменении усилия пружины 3 изменяется  $p_{верх}$  – давление, при котором отключается насосная установка.

При воздействии на винт 9 и перемещении упора 10 изменяется  $p_{ниж}$  – давление, при котором включается насосная установка.

Причем при уменьшении размера  $a$  снижается  $p_{ниж}$ .

### 7.3 Схема САУ экспериментальной установки

Подробное описание стенда для исследования позиционной САУ, работающей по давлению, – см. лабораторную работу 1.

На рисунке 7.2 представлена функциональная схема стенда:

ПБ – пневматический бак, в котором располагается резиновая емкость, заполняемая водой;

НУ – насосная установка (центробежный насос);

РД – регулятор давления;

F – механический расходомер;

P – датчик давления (пружинный манометр).

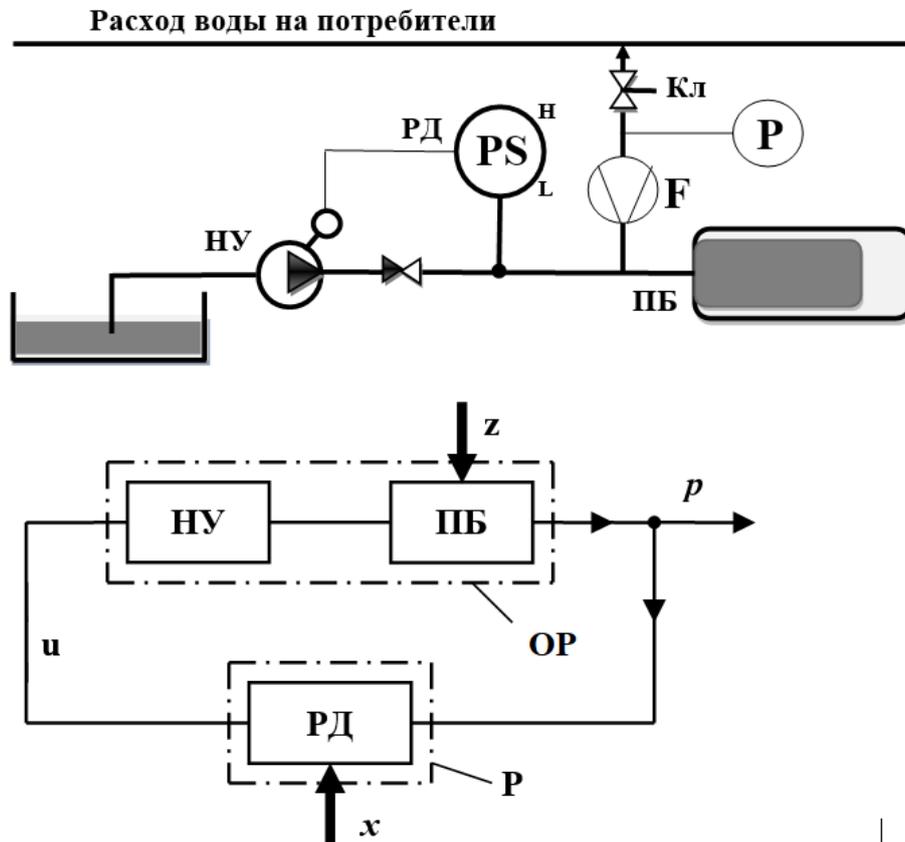


Рисунок 7.2. – Функциональная схема САУ с регулированием по давлению

Как видно из рисунка 7.2, САУ состоит из объекта регулирования ОР и регулятора P. Основными устройствами, входящими в объект регулирования, являются пневматический бак ПБ (резервуар с водой) и насосная установка НУ, включающая центробежный насос с приводным однофазным эл/двигателем.

Регулятором в данном случае является реле давления РД. Реле давления управляет контактами, замыкающими и размыкающими электрическую цепь управления электродвигателем насосной установки.

Возмущающим воздействием  $z$  является расход воды на потребителей.

Задающее воздействие  $x$  – воздействия, направленные на регулирование верхнего и нижнего порогов срабатывания реле давления.

Пневматический бак представляет собой резервуар, разделенный водонепроницаемой упругой диафрагмой, по одну сторону которой находится вода, а по другую – воздух под давлением.

Предусмотрена возможность изменения давления воздуха, для чего в корпус пневмобака установлен ниппель с золотником, имеющий такие же присоединительные размеры, как и ниппель с золотником автомобильного колеса (место установки ниппеля с золотником закрыто резиновой заглушкой).

Расход воды из пневматического бака на стенде осуществляется в верхний бак Б2 через трубопровод, в котором установлен вентиль Кл.

С помощью вентиля имеется возможность изменения сопротивления сети потребителей.

Таким образом, с помощью трубопровода с установленным в нем вентилем и верхнего бака на стенде имитируется система потребления воды.

Из верхнего бака вода перетекает в нижний бак через переливной нерегулируемый патрубок или через клапан расхода, расположенный с правой стороны стенда.

Из нижнего бака вода всасывается насосом.

## 7.4 Проведение испытаний

### 7.4.1 Подготовка установки к работе

Перед включением установки необходимо:

1. С помощью перемычек со штекерами обеспечить схему электрических соединений в соответствии с рисунком 7.3 (на передней панели управления).

2. На модуле гидравлического управления закрыть вентили В3 и В5 (закрытие вентиля осуществляется путем вращения маховика управления по часовой стрелке). Вентиль В4 полностью открыть, также целесообразно закрыть вентиль В6 (при этом рукоятка управления вентилем В6 должна быть установлена перпендикулярно оси трубопровода).

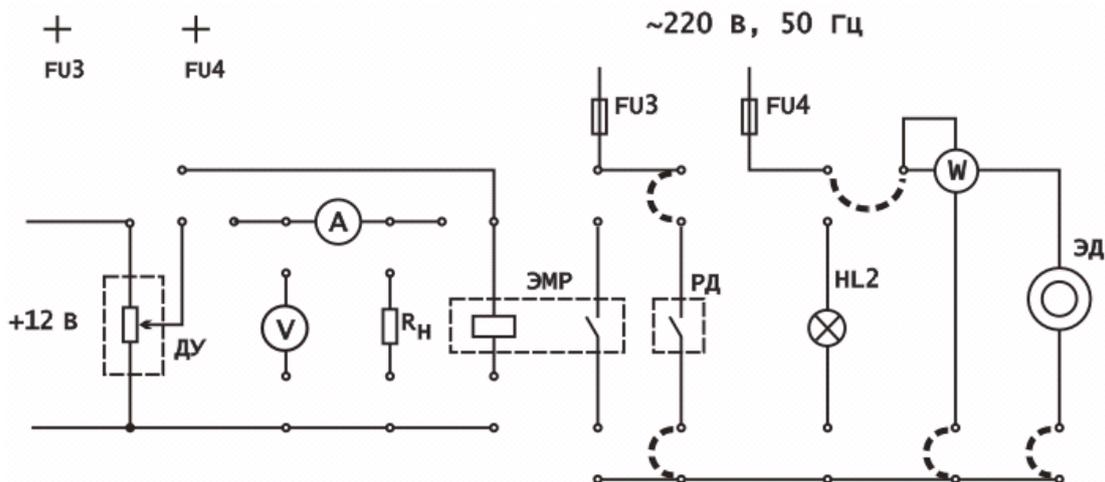


Рисунок 7.3. – Схема электрических соединений

#### 7.4.2 Методика испытаний

После выполнения условий, описанных в п. 7.4.1, необходимо:

1. Закрыть вентиль В2 (Кл) и включить электрическое питание стенда. Для этого тумблер «СЕТЬ» на модуле электрического управления установить в верхнее положение.

Насос начнет подавать воду в пневматический бак.

При достижении давлением в баке значения, равного верхнему порогу срабатывания реле давления  $P = p_{верх.i}$ , насосная установка отключится. Необходимо зафиксировать по манометру  $P$  значение  $p_{верх.i}$ , а также показание расходомера  $F = V_{нач.i}$ .

Затем следует приоткрыть вентиль В2 (Кл), при этом начнется процесс опорожнения пневматического бака в верхний бак и давление (см. по манометру  $P$ ) будет уменьшаться.

При достижении давлением нижнего порога срабатывания реле давления  $p_{ниж.i}$  насосная установка включится.

В момент включения насосной установки необходимо отключить питание стенда и зафиксировать  $P = p_{ниж.i}$ , а также показание расходомера  $F = V_{кон.i}$  и уровень в верхнем баке.

Результаты измерений занести в таблицу 7.1.

**ВНИМАНИЕ!** Не открывайте вентиль В2 (Кл) больше, чем на один оборот, т.к. может не успевать срабатывать реле РД на запуск при быстром понижении давления.

Опыты по п. 1 необходимо повторить трижды при различной степени открытия клапана Кл ( $170^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $190^\circ$ ) с фиксацией времени опорожнения резервуара для оценки расхода на потребителей.

Таблица 7.1. – Результаты измерения параметров регулирования

№ опыта	Пороговые значения давлений, кгс/см <sup>2</sup>		Показания расходомера, м <sup>3</sup>		V <sub>пв.г</sub> – объем пневматического бака, заполняемый водой, м <sup>3</sup>	Показания секундомера, с		Средний расход на потребителей Q = ΔV/Δt
	p <sub>верх.г</sub>	p <sub>ниж.г</sub>	V <sub>нач.г</sub>	V <sub>кон.г</sub>		t <sub>нач</sub>	t <sub>кон</sub>	
1								
2								
3								

2. Снять циклограммы системы регулирования по давлению P при трех положениях регулирующего клапана Кл подачи воды на потребителей: открытие клапана на 170°, 180° и 190°. Результаты занести в таблицу 7.2.

Таблица 7.2. – Результаты снятия циклограммы САУ

Опыт 1		Опыт 2		Опыт 3	
давление	время	давление	время	давление	время
0,06		0,06		0,06	
0,2		0,2		0,2	
0,3		0,3		0,3	
0,37 откл.		0,37 откл.		0,37 откл.	
0,3		0,3		0,3	
0,2		0,2		0,2	
0,1		0,1		0,1	
0,06 включ.		0,06 включ.		0,06 включ.	
0,2		0,2		0,2	
0,3		0,3		0,3	
0,37 откл.		0,37 откл.		0,37 откл.	
0,3		0,3		0,3	
0,2		0,2		0,2	
0,1		0,1		0,1	
0,06 включ.		0,06 включ.		0,06 включ.	
0,2		0,2		0,2	
0,3		0,3		0,3	
0,37 откл.		0,37 откл.		0,37 откл.	
0,3		0,3		0,3	
0,2		0,2		0,2	
0,1		0,1		0,1	
0,06 включ.		0,06 включ.		0,06 включ.	

## 7.5 Обработка результатов

1. По результатам измерений построить графические зависимости (циклограммы):

$P_i = f(t)$  при открытии клапана Кл на  $170^\circ$ ;

$P_i = f(t)$  при открытии клапана Кл на  $180^\circ$ ;

$P_i = f(t)$  при открытии клапана Кл на  $190^\circ$ .

2. Под каждым графиком циклограммы в том же масштабе времени дать диаграмму включения-отключения электродвигателя насоса  $U = f(t)$ .

3. В выводах показать максимальный объем жидкости и отметить характер изменения циклограммы при уменьшении расхода на потребителей.

## 7.6 Контрольные вопросы

1. Пояснить конструкцию реле-регулятора по давлению. С помощью какого механизма обеспечивается зона неоднозначности?

2. В чем достоинства и недостатки принципа регулирования по возмущению?

3. Что представляют собой объект регулирования в исследуемой САР?

4. По какому параметру осуществляется регулирование?

5. Поясните причину, по которой необходимо обеспечивать наддув бака-накопителя САР.

6. Как зависит энергия, потребляемая САР, от расхода воды?

7. Почему слишком большое открытие клапана расхода на потребителей не позволяет срабатывать релейной схеме САР на отключение двигателя насоса?

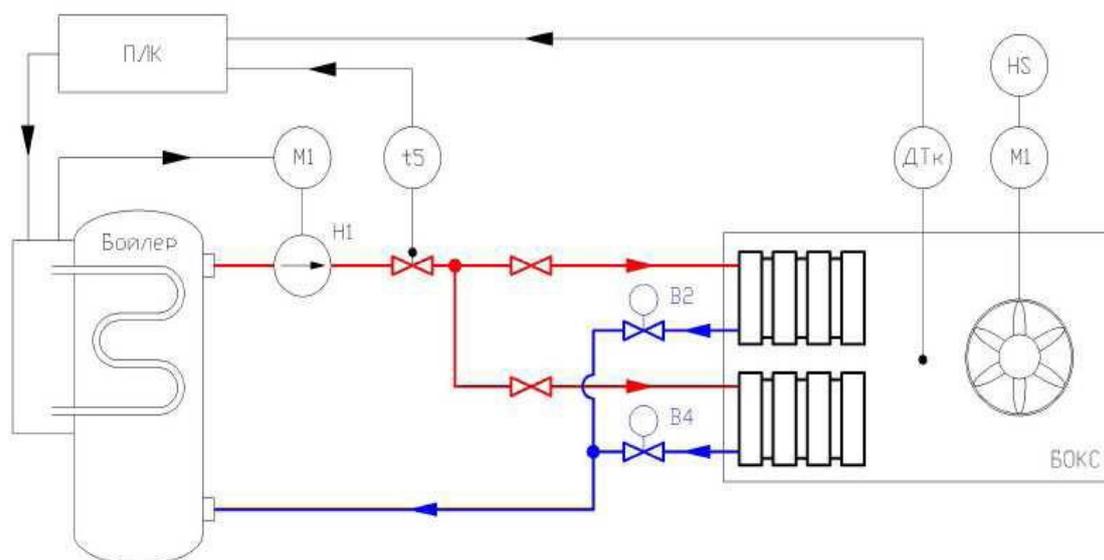
**Лабораторная работа 8**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**  
**ПОДДЕРЖАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОТАПЛИВАЕМОМ ОБЪЕМЕ**  
**С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММИРУЕМОГО КОНТРОЛЛЕРА ALPHA-2**

**8.1 Цель работы**

1. Изучение возможностей, среды программирования и обмена данными с ПЛК ALPHA-2.
2. Исследование системы автоматизации теплоснабжения с поддержанием температуры в отопляемом объеме бокса с применением ПЛК.

**8.2 Описание стенда моделирования системы отопления**

Схема системы автоматизации отопления приведена на рисунке 8.1.



**Рисунок 8.1. – Схема автоматизации системы теплоснабжения бокса**

Датчик t5 (термосопротивление Pt500) служит для измерения температуры теплоносителя на подаче (горячая вода с выхода котла).

Датчик ДТк (термосопротивление СТ 1-17) служит для измерения температуры в исследуемом объеме (боксе).

Датчик ДТн (термосопротивление СТ 1-17, на рисунке 8.1 не показано) служит для измерения температуры окружающей среды (помещения в котором установлен стенд).

Исполнительные механизмы системы автоматизации:

1. Нагревательный элемент (ТЭН) электродкотла.
2. Циркуляционный насос Н1 (встроен в котел).

В качестве системы управления выступает ПЛК Mitsubishi AL-2 14MR-D. Поступающие на входы сигналы с термодатчиков преобразуются в значение температур.

Контроллер программируется на выполнение прямого регулирования и с использованием 2-позиционного алгоритма регулирования температуры в отапливаемом объеме.

### 8.3 Порядок составления программы-прошивки ПЛК

Порядок программирования и определения коэффициентов аналого-цифрового преобразования (АЦП) показан далее.

Для программирования контроллера необходим компьютер с COM портом или переходник USB-RS232, кабель Mitsubishi AL-232CAB и установленное программное обеспечение Mitsubishi.

Для создания управляющей программы контроллера нужно запустить программный пакет Alpha Programming (рисунок 8.2).



Рисунок 8.2. – Внешний вид ПЛК ALPHA-2

Открыть в окне программы файл прошивки контроллера «Нагрев по T5 в боксе.vls», либо создать пустое графическое поле программирования.

Для создания программы потребуются блоки:

- аналого-цифровой преобразователь на входе, к которому подключен термометр Т5;
- блок калибровки цифрового сигнала;
- блок управления по параметрам « < », « = », « > »;
- блок создания зоны неоднозначности («мертвой зоны»);
- блок временной задержки для управления насосом протяжки котла,
- блоки релейного управления включением нагревателя и насоса.

Замена, добавление и настройки параметров отдельных блоков программы-прошивки выполняются согласно инструкции по работе с программным пакетом Alpha Programming.

Для контроля работоспособности программы перед заливкой в ПЛК, запускается «Симуляция» готового проекта в среде Alpha Programming. При этом моделируется работа контроллера, а изменение значений переменных осуществляется вручную.

Во время моделирование задаются величины входных сигналов и определяется состояние вычислительными процессами и значение выходов ПЛК.

При успешном моделировании процесса программа-прошивка записывается в ПЛК (рисунок 8.3).

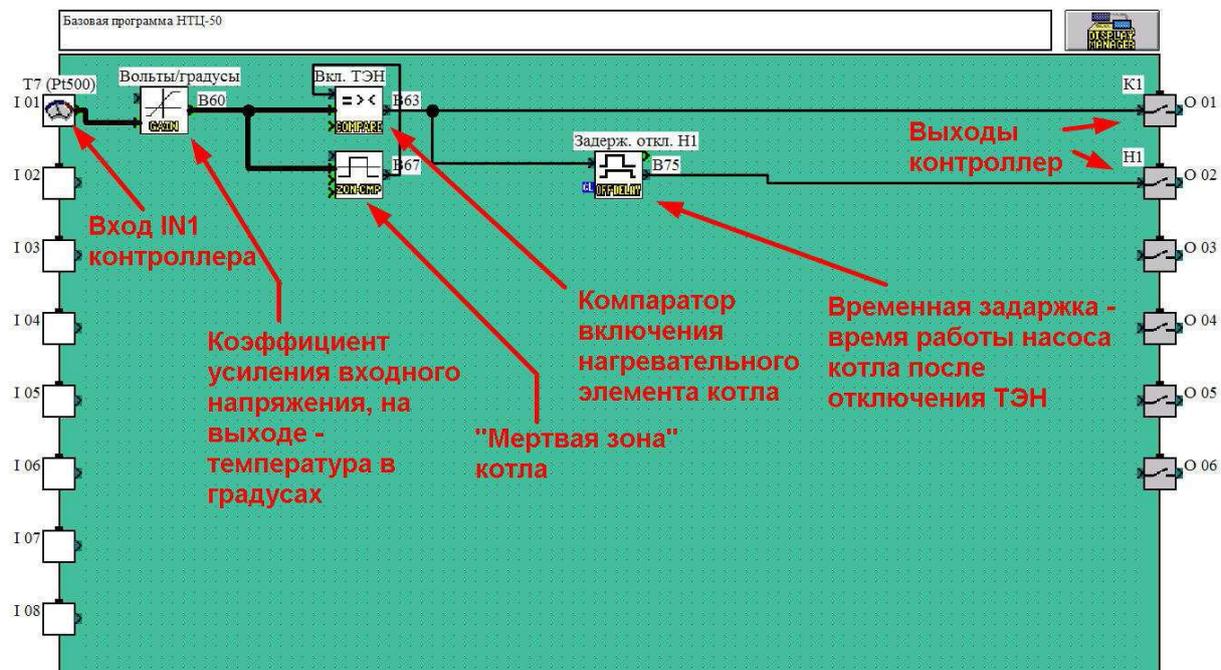


Рисунок 8.3. – Внешний вид окна создания программы для контроллера AI-2

Определяются коэффициенты аналогоцифрового преобразования для датчиков температуры.

#### 8.4 Градуировка сигнала термосопротивления для корректного представления температуры на ПЛК

1. Запустить программу Alpha Programming на компьютере. Произвести подключение к ПЛК и записать в него эту программу.
2. Запустить программу на выполнение, включить режим мониторинга, нажав соответствующую пиктограмму «М».
3. Поместить сенсор датчика T5 под крепление трубопровода подачи теплоносителя в районе датчика T1.
4. Снять в окне программы показания АЦП<sub>1</sub> на входе ПЛК при комнатной температуре. Значение действительной температуры теплоносителя на подаче T<sub>1</sub> контролируется по показаниям прибора T1 на щите стенда.
5. Данные занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1

Истинное значение температуры, °С		Показания АЦП, соответствующие T <sub>1</sub> и T <sub>2</sub>	
T <sub>1</sub>		АЦП <sub>1</sub>	
T <sub>2</sub>		АЦП <sub>2</sub>	

6. Включить котел (переключатель на передней панели котла).
7. После нагрева теплоносителя снять в окне программы показания АЦП<sub>2</sub> на входе ПЛК при горячем теплоносителе. Значение действительной температуры теплоносителя на подаче T<sub>2</sub> контролируется по прибору T1.
8. Данные занести в таблицу 8.1.
9. Выключить котел.
10. Решить систему уравнений (7.1):

$$\begin{cases} T_1 = \frac{A}{B} \text{АЦП}_1 + C; \\ T_2 = \frac{A}{B} \text{АЦП}_2 + C, \end{cases} \quad (8.1)$$

где  $T_x$  – действительная температура теплоносителя (по прибору T1);  
АЦП<sub>x</sub> – значение сигнала на входе ПЛК во время выполнения программы в режиме мониторинга.

Получим:

$$A = T_2 - T_1; B = \text{АЦП}_2 - \text{АЦП}_1; C = T_1 - \text{АЦП}_1 * A/B.$$

11. Результаты решения системы уравнений получим значения А, В и С, которые заносятся в блок калибровки [B60] (рисунок 8.4).

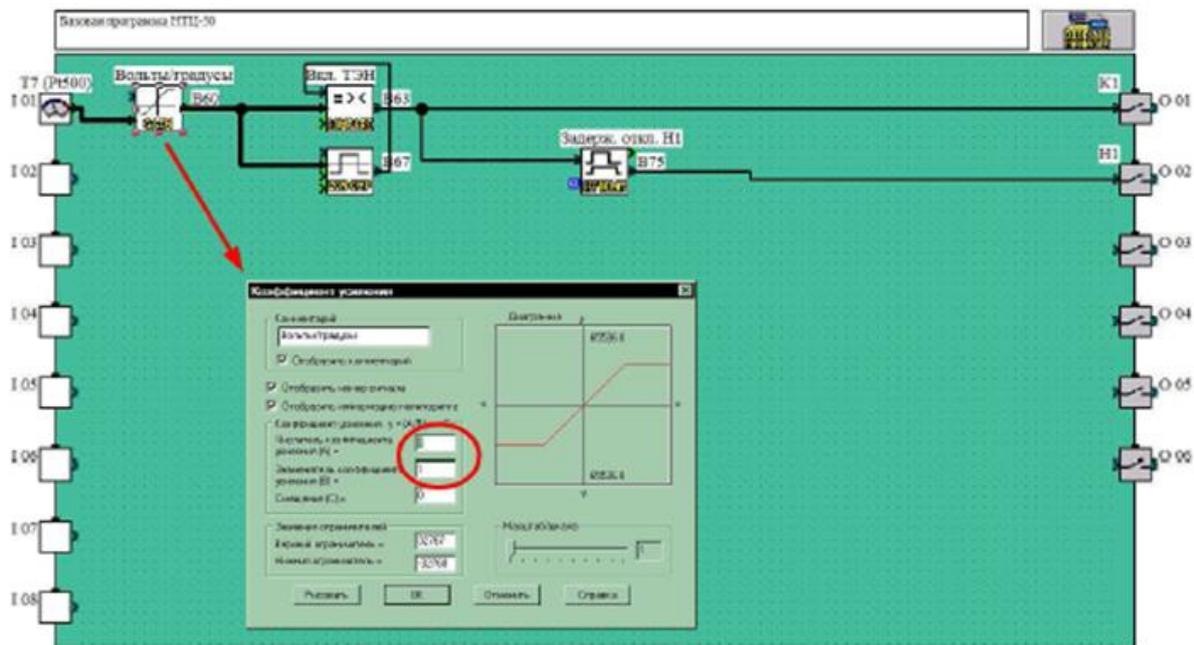


Рисунок 8.4. – Форма окна блока калибровки сигнала после АЦП

## 8.5 Проведение испытаний

Рабочая схема станда приведена на рисунке 8.5.

1. Установить скорость работы циркуляционного насоса котла Н1 равной II. Для этого перевести регулятор на корпусе насоса в положение II.
2. Включить питание станда (автоматический выключатель «Сеть»).
3. Убедиться, что все вентили на подающем и обратном трубопроводах котла открыты (ручки вдоль трубопроводов), при необходимости перевести их в открытое состояние.
4. Открыть полностью вентиль В2 на распределителе.
5. Запустить на компьютере, подключенном к контроллеру А1-2 программу среде Alpha Programming.
6. Открыть в окне программы файл прошивки контроллера «Нагрев по Т5 в боксе.vls» с откорректированными показаниями температуры Т5.
7. В блок «=><» ввести ограничение по температуре <50.
8. В блок зоны неоднозначности внести: нижнее значение зоны «45», верхнее значение зоны «50», а срабатывание «отключение в зоне».

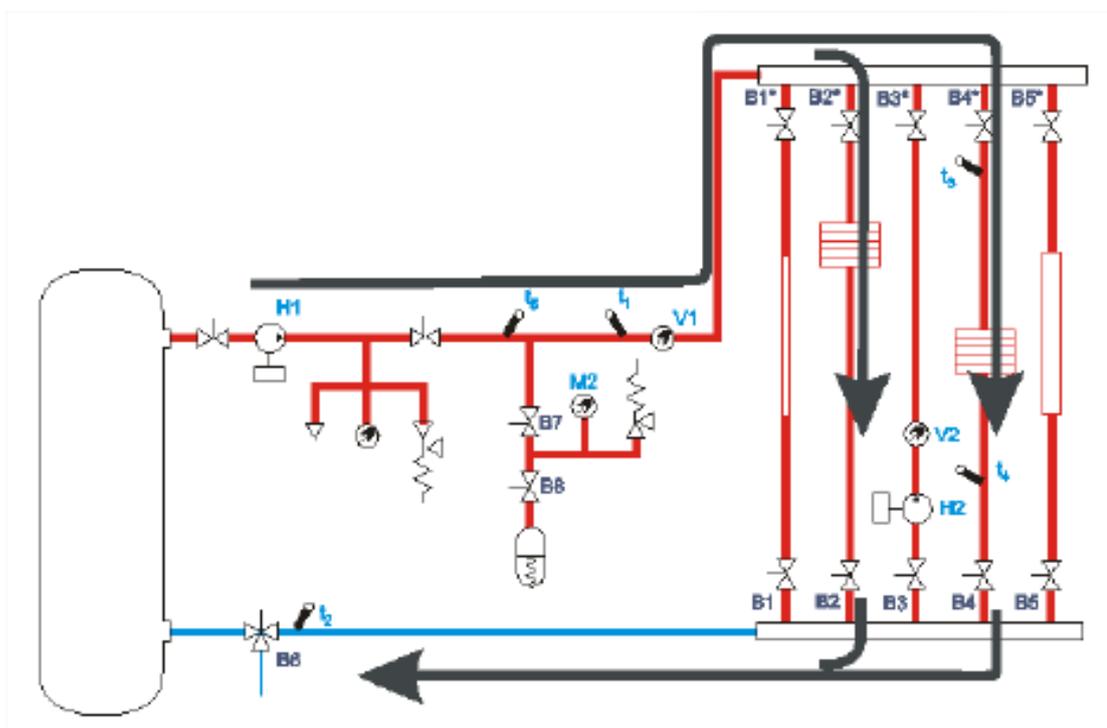


Рисунок 8.5. – Рабочая схема стенда

9. В блок задержки отключения насоса внести: задержка операции Выключения – «60 секунд».

10. Остановить ПЛК.

11. Записать файл-прошивку в ПЛК.

12. Запустить ПЛК.

13. Программу-прошивку на компьютере перевести в режим «Мониторинга».

14. Перевести переключатель на панели стенда SA1 «Режим управления котла» в положение «Внеш.».

15. Установить величину задания для котла по температуре (с помощью регулятора температуры или кнопок на передней панели управления котла) равную  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , чтобы собственная автоматика котла не вмешивалась в управление от контроллера.

16. Если температура теплоносителя превышает комнатную более чем на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , откройте вентили B1...B5 на распределителе. Включите котел на минимальной настройке температуры (нагревательный элемент не должен включаться) и дождитесь падения температуры.

17. Снять показания теплосчетчика Q1 и электросчетчика W1.

18. Включить котел переключателем на передней панели котла.

19. По мере нагрева отапливаемого объема снимать зависимость роста температуры теплоносителя и температуры в отапливаемом объеме во времени. Значение температуры в отапливаемом объеме контролируется по показаниям термометра Т5 на поле окна «Мониторинг» на компьютере рядом с блоком калибровки параметр «val», а температуры теплоносителя по термометру Т1 на индикаторе стенда с периодичностью 30 с на протяжении 10 мин.

20. Данные заносятся в таблицу 8.2.

21. По завершении этого промежутка времени снять показания теплосчетчика Q1 и электросчетчика W1 и занести в таблицу 8.2.

Израсходованную на нагрев отапливаемого объема электроэнергию и отпущенное тепло найти как разность показаний электросчетчика и теплосчетчика в начале и конце опыта.

Таблица 8.2

Время разогрева, с	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480	510	540	570	600	
Режим прямого регулирования																						
$T_1, ^\circ\text{C}$																						
ДТк, $^\circ\text{C}$																						
W, Вт ч			$\Delta W = W_{\text{нач}} - W_{\text{кон}} =$																			
Q, кДж			$\Delta Q = Q_{\text{нач}} - Q_{\text{кон}} =$																			

22. После завершения испытаний отключить котел кнопкой на лицевой панели котла.

23. Выключить питание стенда.

24. Снять давление в системе стенда.

### 8.6 Обработка результатов экспериментальных исследований

1. Построить графики функций  $T_1 = f(t)$  и  $ДТк = f(t)$  (на одном поле) для режима прямого регулирования.

2. Сформулировать собственные выводы по выполненному исследованию.

### 8.7 Контрольные вопросы

1. Какие сигналы может принимать контроллер?
2. Какое устройство в составе контроллера преобразует аналоговый сигнал в цифровой?

3. Почему необходимо калибровать цифровой сигнал?
4. Что делать, если характеристика датчика нелинейная?
5. Всегда ли необходимо калибровать цифровой сигнал?
6. Программа формируется в виде связанных блоков на поле программирования, а еще какие методы программирования контроллера AL-2 предусмотрены изготовителем этого контроллера?
7. Что происходит с программой, набранной в графическом поле, при нажатии пиктограммы «Запись в контроллер»?
8. Можно ли отладить программу, набранную в графической форме, без контроллера?
9. Какой управляющий сигнал формирует контроллер на выходе?
10. Можно ли связать в одном контроллере несколько контуров управления технологическим процессом? Если можно, то каким образом?
11. Можно ли подключить контроллер к компьютеру? Если можно, то каким образом?
12. Как проконтролировать: работает контроллер или нет?
13. Что такое «зона неоднозначности», зачем она нужна и как она реализована в контроллере?
14. Какие преимущества имеет контроллер перед простым релейным регулятором?

## Лабораторная работа 9 НАСТРОЙКА КОНТРОЛЛЕРА НА ПИД-ЗАКОН РЕГУЛИРОВАНИЯ

### 9.1 Цель работы:

1. Изучить основы ПИД-закона регулирования.
2. Изучить устройство и порядок программирования одноканального ПИД-регулятора ОВЕН ТРМ210.
3. Выполнить интерактивную настройку регулятора на ПИД-закон регулирования под заданные параметры качества регулирования.

### 9.2 Краткие теоретические сведения

#### 9.2.1 Структурная схема ПИД-регулятора.

ПИД-регуляторы находятся в широком диапазоне применений для управления промышленными процессами. Приблизительно 95% операций с замкнутым контуром в промышленной автоматизации используют ПИД-регуляторы. Аббревиатура «ПИД» обозначает «пропорционально-интегральная-дифференциальный». Эти три составляющие универсального закона регулирования объединены таким образом, что он создает управляющий сигнал ПИД (рисунок 9.1).

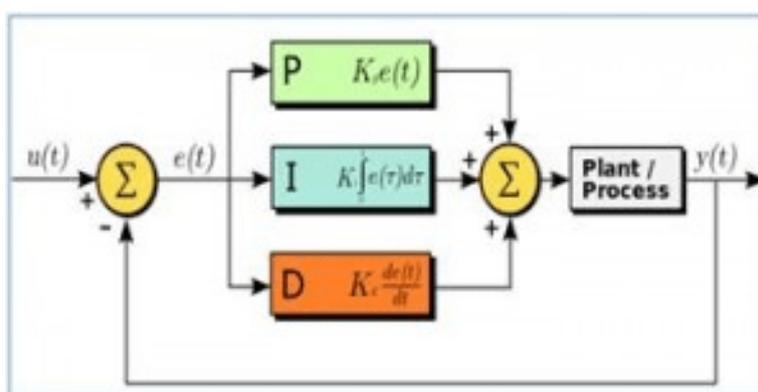


Рисунок 9.1. – Общая схема работы ПИД-регулятора

#### 9.2.2 ПИД-закон регулирования:

Пропорциональная составляющая (П) – пропорциональна разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования).

Интегральная составляющая (И) – интеграл сигнала рассогласования.

Дифференциальная составляющая (Д) – производная сигнала рассогласования.

Пропорциональная составляющая (П) – это рассогласование между величиной уставки и сигналом обратной связи. При использовании только пропорциональной составляющей в реальном регуляторе всегда будет иметь место динамическая ошибка. Это происходит потому, что реальный П-регулятор настраивается на начальное отклонение. Например, в замкнутой системе поддержания давления в системе водоснабжения реальное давление при П-регулировании должно быть всегда меньше заданного. Для того чтобы уменьшить эту искусственную динамическую ошибку, необходимо увеличивать коэффициент усиления.

Но чрезмерное увеличение коэффициента усиления пропорциональной составляющей ПИД-регулятора обычно приводит к перерегулированию и автоколебаниям, т.е. к неустойчивой работе замкнутой системы регулирования. Поэтому, на практике поступают так: увеличивают коэффициент усиления пропорциональной составляющей (П) до появления автоколебаний, и после этого, уменьшают этот коэффициент на 20–30%.

В целом, для настройки ПИД-регулятора обычно не требуется глубокого понимания формальной теории управления системами. При этом использование ПИД-регулятора позволяет решить около 90% всех задач управления простыми системами замкнутого цикла.

### 9.2.3 Общие принципы построения ПИД-закона регулирования

На выходе регулятора вырабатывается управляющий (выходной) сигнал  $Y_i$ , действие которого направлено на уменьшение отклонения  $E_i$ :

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \left( E_i + \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \sum_{i=0}^n E_i \Delta t_{\text{изм}} + \tau_{\text{д}} \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{\text{изм}}} \right), \quad (9.1)$$

где  $X_p$  – полоса пропорциональности (настраиваемый параметр P);

$E_i$  – разность между заданными  $T_{\text{уст}}$  и текущими  $T_i$  значением измеряемой величины, или рассогласование;

$T_d$  – постоянная времени дифференцирования (настраиваемый параметр  $d$  – дифференциальная постоянная ПИД-регулятора);

$\Delta E_i$  – разность между двумя соседними измерениями  $E_i$  и  $E_{i-1}$ ;

$\Delta t_{изм}$  – время между двумя соседними измерениями  $T_i$  и  $T_{i-1}$ ;

$T_u$  – постоянная времени интегрирования (настраиваемый параметр  $i$  – интегральная постоянная ПИД-регулятора);

$$\sum_{i=0}^n E_i \Delta t_{изм}$$

– накопленная сумма рассогласований.

Из этой формулы видно, что во время ПИД-регулирования сигнал управления зависит:

– от разницы между текущим параметром  $T_i$  и заданным значением  $T_{уст}$  измеряемой величины  $E_i$ , которая реагирует на ошибку регулирования ( $\frac{E_i}{X_p}$ );

– скорости изменения параметра  $\frac{\Delta E_i}{\Delta t_{изм}}$ , которая позволяет улучшить качество переходного процесса, выражение  $\tau_d \frac{1}{X_p} \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{изм}}$  называется дифференциальной составляющей выходного сигнала;

– накопленной ошибки регулирования  $\sum_{i=0}^n E_i \Delta t_{изм}$ , которая позволяет добиться сглаживания колебаний температуры; выражение  $\frac{1}{X_p} \frac{1}{\tau_i} \sum E_i \Delta t_{изм}$  называется интегральной составляющей выходного сигнала.

Для эффективной работы ПИД-регулятора следует установить правильные для конкретного объекта регулирования значения переменных  $X_p$ ,  $T_d$  и  $T_u$ , которые требуется определить в процессе лабораторной настройки.

## 9.3 Экспериментальная установка

### 9.3.1 Описание контроллера ОВЕН ТРМ 210

Внешний вид контроллера показан на рисунке 9.2.

В комплекте с первичным преобразователем он предназначен для измерения и автоматического регулирования температуры (при использовании в качестве первичных преобразователей термопреобразователей сопротивления или термоэлектрических преобразователей), а также других физических параметров, значение которых первичными преобразователями (датчиками) может быть преобразовано в унифицированный сигнал постоянного тока или напряжения. Информация о любом из измеренных физических параметров отображается в цифровом виде на встроенном четырехразрядном цифровом индикаторе.



Рисунок 9.2. – Внешний вид контроллера TPM 210

Приборы могут быть использованы для измерения и регулирования технологических параметров в различных отраслях промышленности, коммунального и сельского хозяйства.

Прибор выполняет следующие функции:

- измерение температуры или другой физической величины;
  - регулирование измеряемой величины по ПИД-закону путем импульсного или аналогового управления или по двухпозиционному закону;
  - автонастройка ПИД-регулятора на установленном объекте;
  - ручное управление выходной мощностью ПИД-регулятора;
  - определение аварийной ситуации при выходе измеряемого параметра за заданные границы и при обрыве в контуре регулирования;
  - обнаружение ошибок работы и определение причины неисправности;
  - работа в сети, организованной по стандарту RS-485, что позволяет задавать необходимые режимы работы прибора и осуществлять контроль;
  - дистанционное управление запуском и остановкой регулирования.
- Функциональная схема прибора приведена на рисунке 9.3.

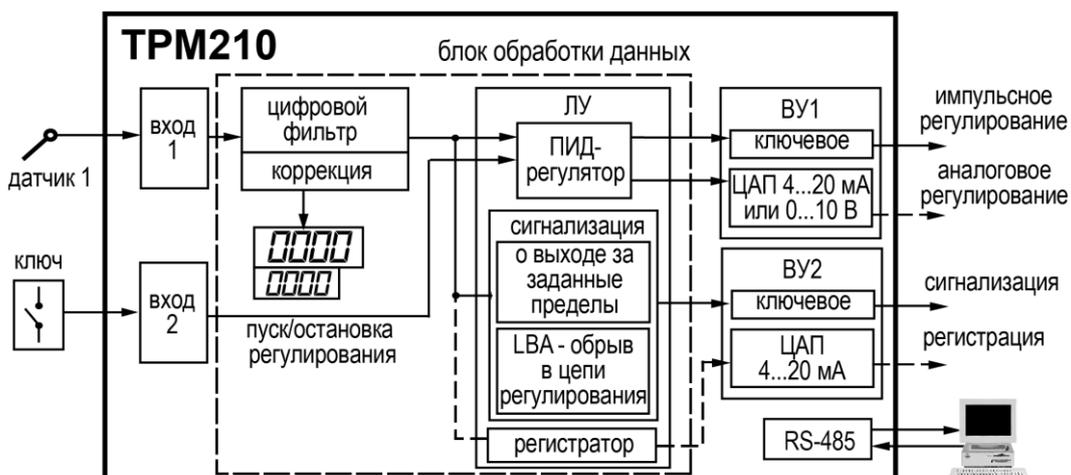


Рисунок 9.3. – Функциональная схема контроллера TPM 210

Прибор имеет один универсальный вход и один дискретный вход управления. В процессе работы прибор опрашивает входные датчики, вычисляя по полученным данным текущие значения измеряемых величин, отображает их на цифровом индикаторе и выдает соответствующие сигналы на ВУ.

Назначение индикаторов и кнопок управления показано в таблицах 9.1–9.3.

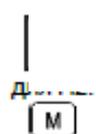
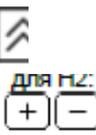
Таблица 9.1. – Назначение верхнего индикатора панели управления

Режим эксплуатации прибора	Отображаемая информация	
	Верхний индикатор	Нижний индикатор
Работа	Текущее значение измеряемой величины	Значение уставки
Настройка	Название параметра настройки	Значение параметра настройки
Меню	Надпись « <i>LVOP</i> »	Название группы параметров
Авария	Обозначение ошибки	Обозначение ошибки

Таблица 9.2. – Назначение светодиодов

Светодиод	Состояние	Значение
K1	Светится	ВУ1 в состоянии ВКЛЮЧЕНО (только для ВУ дискретного типа)
K2	Светится	ВУ2 в состоянии ВКЛЮЧЕНО (только для ВУ дискретного типа)
AL	Мигает	Выход регулируемой величины за заданные пределы
LBA	Мигает	Обнаружен обрыв в цепи регулирования
СТОП	Светится	Регулятор остановлен
	Мигает	Остановка регулятора произошла из-за аварии LBA или аппаратной ошибки
АН	Светится	Выполнение автонастройки, светодиод отключается при удачном завершении
	Мигает	Автонастройка закончена неудачно
RS	Включается на 1 с	Передача данных компьютеру по RS-485
РУЧ	Светится	Режим ручного управления выходным сигналом ПИД-регулятора

Таблица 9.3. – Назначение кнопок управления

Кнопка	Режим эксплуатации прибора	Назначение
	Работа	Вход в меню (нажатие > 3 с)
	Меню	Переход к настройке первого параметра группы. Если отображается группа <i>LVOP</i> (LVOP), то происходит выход из меню.
	Настройка	Краткое нажатие: • переход к следующему параметру группы нажатие > 3 с: • выход в меню к названию группы
	Работа	Увеличение/уменьшение значения уставки на нижнем индикаторе
	Меню	Выбор группы параметров
	Настройка	Увеличение/уменьшение значения параметра (для изменения с ускорением зажать кнопку)
		Увеличение/уменьшение яркости свечения индикаторов

Для управления и настройки параметров контроллера существует 5 вариантов (групп) меню, которые показаны на рисунке 9.4.

Вход в меню осуществляется нажатием и удержанием больше 3 с кнопки «М».

Переключение по группам меню или изменение параметров выполняется нажатием кнопок «+» и «-» (по аналогии: влево-вправо).

Группы меню располагаются в порядке, показанном на рисунке 9.4.

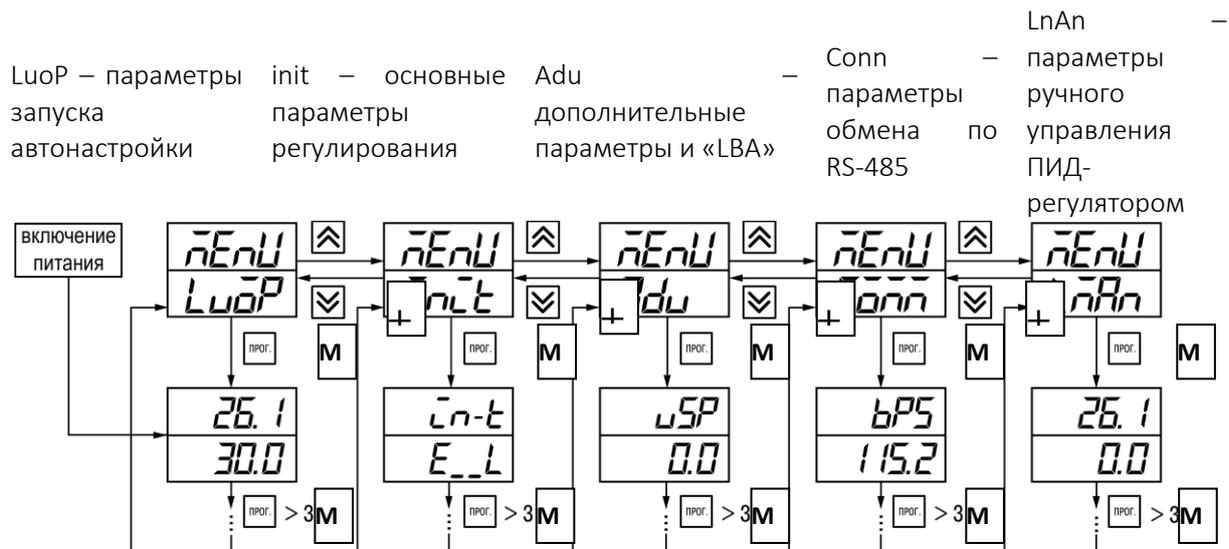


Рисунок 9.4. – Меню настроек контроллера TPM 210.

### 9.3.2 Описание эмулятора печи (ЭП-10)

Эмулятор (модель) печи предназначен для проведения экспериментов в процессе наладочных работ с применением терморегуляторов. ЭП-10 выступает в качестве ТОО и представляет собой миниатюрную печь (рисунок 9.5).



Рисунок 9.5. – Внешний вид эмулятора печи ЭП-10

На печатной плате ЭП-10 смонтированы встроенный нагреватель мощностью 10 Вт и измеритель температуры (термопреобразователь сопротивления ТСМ 50М), клеммные разъемы для подключения к сети питания (220 В) и терморегуляторам ТРМ, а также светодиод для индикации протекания тока через нагреватель при включении нагрева.

## 9.4 Проведение испытаний

### 9.4.1 Общие указания по настройке регулятора

Ручная настройка осуществляется итерационным методом с оценкой процесса по двум показателям:

- наличие колебаний;
- наличие перехода графика регулируемой величины через уставку.

В зависимости от показателей корректировка параметров осуществляется по рекомендациям:

- Увеличение параметра  $K_p$  (уменьшение  $X_p$ ) способствует увеличению быстродействия регулятора. Однако амплитуда колебаний регулируемой величины может возрасти до недопустимого уровня.

- Уменьшение  $K_p$  (увеличение  $X_p$ ) способствует уменьшению колебаний регулируемой величины вплоть до исчезновения. Однако при этом ухудшается быстродействие регулятора и повышается вероятность колебаний регулируемой величины.

- При завышенном значении  $T_i$  процесс подхода регулируемой величины к уставке становится односторонним даже при наличии колебаний. При этом быстродействие регулятора уменьшается.

- При заниженном значении  $T_i$  появляется значительный переход регулируемой величины через уставку. Однако при этом существенно ухудшается быстродействие регулятора и повышается вероятность колебаний регулируемой величины.

- Увеличение  $T_d$  способствует повышению быстродействия системы. Однако при этом повышается ее чувствительность к помехам и возможно появление высокочастотных колебаний регулируемой величины с малым периодом.

Графически анализ колебаний параметров переходного процесса представлен на рисунке 9.6.

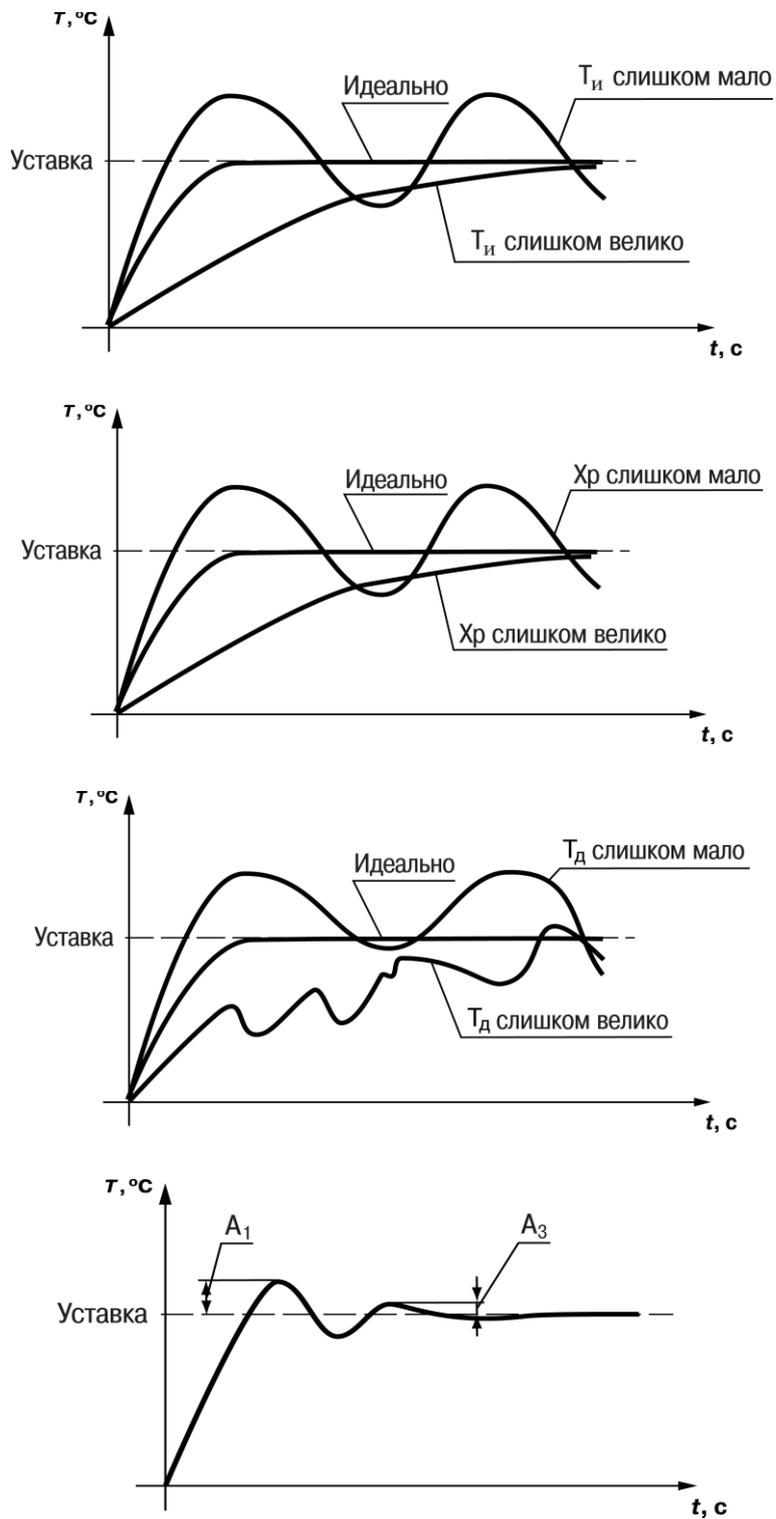


Рисунок 9.6. – Анализ колебаний графика переходного процесса

## 9.4.2 Подготовка установки к работе

1. Включить установку кнопкой «220 V». На индикаторе контроллера появятся сообщения.
2. Перейти в режим программирования удержанием кнопки «M».
3. Перейти в меню группы «LnAn» кнопками «+» или «-».
4. Перейти на параметр «r-S» кратким нажатием на кнопку «M».
5. Изменить его значение на «STOP» кнопками «+» или «-».

**Примечание:** чтобы параметр вступил в силу, необходимо подождать 3 с, затем перейти на другой параметр группы и выйти из группы удерживая кнопку «M» больше 3-х с.

В дальнейшем процесс регулирования может быть запущен или остановлен для изменения уставок только изменением параметра r-S:

rUn – регулятор работает;

STOP – регулятор остановлен, светится светодиод STOP.



### ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ

Если остановка регулятора произошла из-за аварии LVA или аппаратной ошибки, светодиод «STOP» мигает.

6. Перейти в меню группы «Adu» и 3 раза нажать «M».
7. Кнопками «+» «-» установить начальные значения параметров ПИД:  
 $X_P = 1/K_n - P = 500.0$ , нажать «M»;  
 $T_u - i = 0$ , нажать «M»;  
 $T_d - d = 0$ , нажать «M», нажать и удерживать «M» > 3 с.
8. Перейти в меню группы «LnAn».
9. Перейти в режим наблюдения: на индикаторной панели сверху текущие (измеренные) значения температуры, а внизу значение уставки.
10. Изменить уставку на 70 °C (и в дальнейшем не изменять!).
11. Изменить значение «r-S» на «rUn».
12. Перейти в режим наблюдения (п. 9).  
Должна включиться индикаторная лампа на эмуляторе печи.

## 9.4.3 Ход работы

Длительность каждого режима – 10 мин.

Время перерыва – 10 мин (за это время печка остынет до 35 °C).

В ходе наблюдений каждые 30 с фиксировать значения регулируемого параметра.

Во время перерыва для определения амплитуд, периода колебаний и времени установления строить график переходного процесса.

В ходе настройки ПИД-регулятора руководствоваться таблицей 9.4.

### Задание

Выполнить настройку ПИД-регулятора до получения результата: выход на заданный режим 70 °С за 100 с, соотношение первых амплитуд  $A_3/A_1$  не более 0,1, точность регулирования 0,1 °С.

При выполнении работы руководствоваться рекомендациями, изложенными в таблице 9.4.

Таблица 9.4. – Содержание шагов настройки ПИД-регулятора

Шаг	Параметры ПИД			Характер графика переходного процесса	Рекомендации по настройке
	$X_p$	$T_i$	$T_d$		
1	500	0	0	Быстро подходит к уставке, не пересекает, совершает 2 колебания, есть большая динамическая ошибка регулирования	Уменьшить $X_p$ в 2 раза определить период колебаний $T$
2	250	0	0	Быстро подходит к уставке, не пересекает, колебаний нет, но есть большая динамическая ошибка регулирования	Уменьшить $X_p$ в 2 раза
...	...	0	0	Продолжать итерации, пока конечная ошибка регулятора не уменьшится до 2°С	Уменьшить $X_p$ в 2 раза
+1	—	0	0	Быстро подходит к уставке, не пересекает, колебаний нет, динамическая ошибка регулирования уменьшилась до 2,5 °С	Ввести $T_i=T$ секунд
+1	—	—	0	Быстро подходит к уставке, пересекает ее, есть колебания, динамическая ошибка регулирования уменьшилась до 1,5 °С	Уменьшить $X_p$ и $T_i$ в 1.2 раза
...	...		0	Продолжать итерации, пока регулируемая величина не пересечет уставку и не начнет колебания около этого значения	Уменьшить $X_p$ и $T_i$ в 1.2 раза
+1	—	—	0	Быстро подходит к уставке, пересекает ее, есть колебания с отношением амплитуд $>0,1$ , динамическая ошибка регулирования уменьшилась до 0,4 °С	Ввести $T_d=T_i/5$
+1	—	—	—	Быстро подходит к уставке, пересекает ее, есть колебания с отношением амплитуд $>0,3$ , динамическая ошибка регулирования уменьшилась до 0,2 °С	Уменьшить $T_d$ в 2 раза
+1	—	—	—	Колебания в пределах нормы, ошибка регулирования не превышает $\pm 0,1$ °С	Уменьшить $T_d$ на 20%
+1	—	—	—	Задание выполнено - регулятор настроен	

После завершения испытаний перевести режим работы контроллера в положение «STOP» и снять электропитание выключателем на лицевой панели.

### 9.5 Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Все промежуточные графики переходного процесса с указанием текущих значений параметров ПИД-регулятора:  $X_p$ ,  $T_u$ ,  $T_d$ .
3. Завершающий график переходного процесса регулирования, значения полученных амплитуд  $A_1$  и  $A_3$ , время выхода на режим и параметры ПИД-регулятора.
4. Выводы. Сравнить параметры качества переходного процесса в начале и в конце настройки: время установления, время регулирования, наличие статической ошибки.

### 9.6 Контрольные вопросы

1. В чем состоит назначение ТРМ 210?
2. Каково устройство ТРМ 210?
3. Каков принцип работы ТРМ 210?
4. Перечислите технические характеристики ТРМ 210.
5. Какова последовательность программирования ТРМ 210?
6. Как влияют программные настройки ТРМ 210 на процесс регулирования?

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ  
И ЗАДАНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ  
для студентов различных специальностей и форм обучения  
по дисциплине «Автоматизация технологических систем»**

**Цель и задачи практической работы**

Цель работы: изучение студентами принципов разработки функциональных схем автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) в системах тепло-, водоснабжения и химических производств, их классификации и оформления технической документации.

**Содержание практической работы**

**1. Разработка функциональной схемы АСУ ТП объекта.**

Дается описание режимов работы объекта, заданного соответствующим вариантом.

С использованием условных обозначений отдельных элементов схемы по ГОСТ 21.404-85 строится схема автоматического регулирования по отклонению регулируемой величины или по изменению возмущающего фактора.

**2. Классификация контуров автоматического регулирования.**

По разработанной схеме и ее описанию определяется, что является:

- управляемым параметром согласно цели управления по заданию;
- регулирующим воздействием (выбирается самостоятельно);
- возмущающим воздействием, допускающим стабилизацию, контролируемым или неконтролируемым, регистрируемым или нереги-стрируемым.

Определяются остальные классификационные признаки АСУ.

Составляется классификационная таблица системы автоматического управления в соответствии с приведенной в методике схемой классификации.

**3. Оформление технического задания на разрабатываемую АСУ**

Заполняется форма таблицы технического задания на проектирование АСУ ТП заданного объекта.

## Введение

Специальные устройства, которые в течение длительного времени требуемым образом изменяют или поддерживают неизменными какие-либо физические величины (температуру, давление и пр.) в управляемом технологическом процессе, называются **автоматизированными системами управления технологическими процессами** (АСУ ТП).

АСУ ТП осуществляет управление без участия человека и формирует воздействия, обеспечивающие требуемый режим работы объекта управления – постоянство выходных величин, характеризующих состояние объекта управления или их изменение в соответствии с заданным законом (например, в соответствии с температурным графиком изменения степени подогрева теплоносителя, подаваемого в систему отопления).

Следует четко различать, какой параметр в АСУ ТП является регулируемым (обычно это уровень, расход или соотношение расходов), а какой регулирующим (обычно это расход воды или химреагента). **Если параметры регулирования и управления в АСУ ТП будут заданы неверно – система будет неработоспособна!**

В представленных ниже заданиях на самостоятельную работу **регулируемый параметр называется заданным**, а регулирующее воздействие выбирается студентом самостоятельно.

Проектирование АСУ ТП при строительстве реального объекта осуществляется поэтапно.

На **первом этапе** разрабатывается и классифицируется структурная схема АСУ ТП, а также оформляется техническое задание на проектирование электромеханической части средств АСУ ТП и дополнительных контрольно-измерительных приборов, которые не относятся к АСУ ТП.

Разработчик на первом этапе должен не только изобразить общую схему автоматизации, кратко описав регулируемый технологический процесс, но и дать классификацию схемы автоматизации, руководствуясь таблицей классификационных признаков.

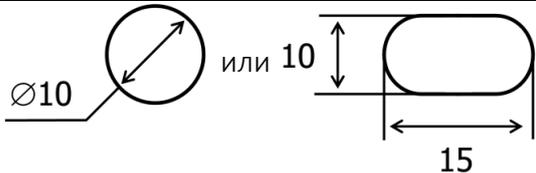
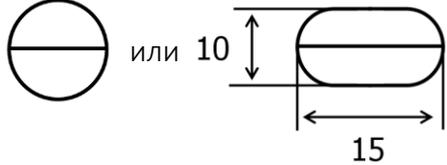
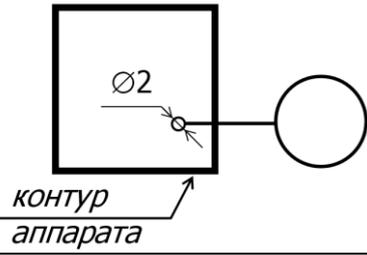
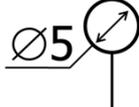
На **втором и последующих этапах** проектирования и наладки АСУ ТП, осуществляемых еже специалистами по электротехническим средствам и электронике, в соответствии с ТЗ выполняется разработка электрических схем автоматизации, функциональной структуры узлов автоматического контроля и автоматического регулирования, а также выбор и оснащения их техническими средствами автоматизации и контрольно-измерительных приборов.

# 1 Использование условных обозначений технических средств автоматизации при разработке структурных схем АСУ ТП заданных объектов

Изображение технических средств автоматизации (ТСА) на структурных схемах производится в соответствии с ГОСТ 21.404-85 «Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах».

Графические обозначения технических средств автоматизации, устанавливаемые ГОСТом, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование	Обозначение
Прибор (преобразователь, средство контроля, регулятор и т.д.) устанавливаемый по месту, непосредственно на ТООУ	
Прибор (преобразователь, средство контроля, регулятор и т.д.) устанавливаемый вне ТООУ, на шите, пульте управления, или функция управления, реализуемая микропроцессорным контроллером	
Обозначение постоянного подключения прибора к трубопроводу, аппарату	 <p><i>трубопровод или контур аппарата</i></p>
То же, при необходимости указания конкретной точки контроля параметра, места расположения отборного устройства или чувствительного элемента датчика, и т.п.	 <p><i>контур аппарата</i></p>
Общее обозначение исполнительного механизма (ИМ)	

При построении обозначения ТСА на строительном чертеже в верхней части графического изображения записывают последовательность условного буквенного обозначения ТСА, принятого в рамках этого ГОСТа, а в нижней части – цифровое обозначение схемы (или чертежа, если чертежей несколько) и позиции этого ТСА в спецификации.

**Первая позиция** условного буквенного обозначения – позиция  $\alpha$  на рисунке 1 – это основное обозначение измеряемой (регулируемой) величины.

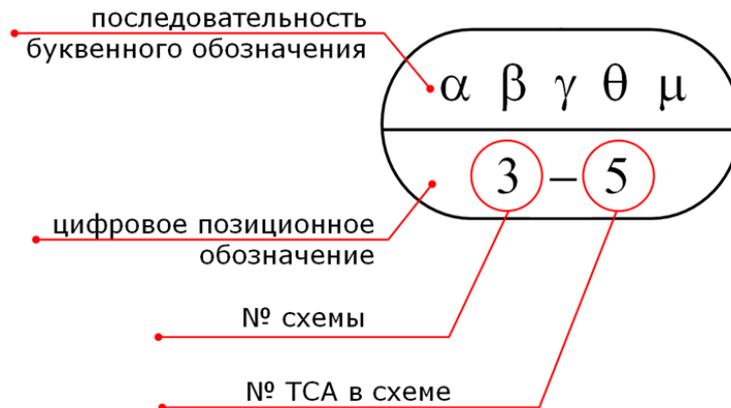


Рисунок 1. – Изображение ТСА на строительном чертеже

При этом следует помнить, что измерение регулирующих величин (гидравлического сопротивления клапана, положения штока клапана, скорости вращения вентилятора или насоса) в системах АСУ ТП обычно не производится.

Для обозначения измеряемых (регулируемых) параметров ГОСТом определены первые буквы соответствующих английских названий:

*T* – температура;

*F* – расход;

*L* – уровень;

*P* – давление;

*Q* – концентрация;

*M* – влажность;

*G* – положение;

*S* – скорость

и т.д. (обозначения для других параметров – см. ГОСТ 21.404-85).

**Вторая позиция** буквенного обозначения – позиция  $\beta$  на рисунке 1 – это дополнительное (необязательное) обозначение измеряемой (регулируемой) величины.

В качестве дополнительного обозначения используются только следующие 4 буквы:

*Q* – интегрирование, суммирование показаний во времени (счетчик);

*J* – автоматическое переключение средства контроля между несколькими точками контроля;

*F* – соотношение двух показаний между собой, доля;

*D* – разность двух показаний, перепад.

И если второй символ буквенного обозначения не совпадает ни с одним с одним из этих 4-х вариантов, то это не дополнительное обозначение величины, а обозначение функционального признака ТСА.

Следующие три позиции. Под обозначение функциональных признаков ТСА зарезервированы все оставшиеся позиции буквенного обозначения (позиции  $\gamma$ ,  $\theta$ , и  $\mu$  на рисунке 1).

В качестве обозначений используются 5 букв:

*I* – показание (представление измеряемой величины), индикация;

*R* – регистрация (запоминание или запись измеряемой величины);

*C* – автоматическое регулирование, управление;

*S* – релейное включение, отключение, переключение;

*A* – сигнализация по пределам измеряемой величины.

При указании нескольких функциональных признаков из этого перечня строго соблюдается приведенный порядок перечисления обозначений.

Например, если средство контроля осуществляет индикацию, регистрацию измеряемого параметра, переключение при достижении им предельного значения и сигнализацию достижения предельного значения, то порядок указания функциональных признаков будет такой - *IRSA*.

Примеры обозначений ТСА с указанием функциональных признаков из основного перечня приведены на рисунке 2.

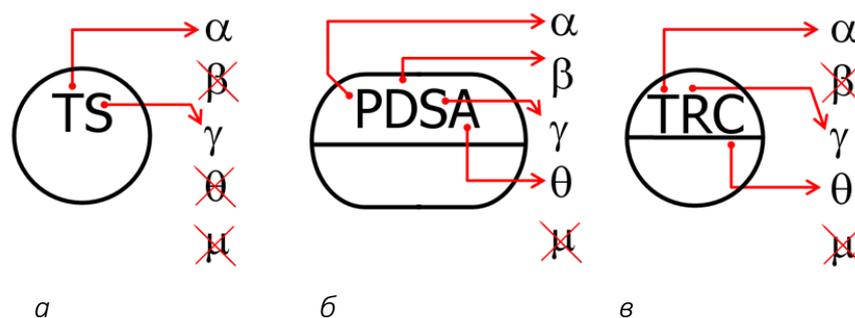


Рисунок 2. – Примеры обозначения ТСА

Рисунок 2, *a* – вторая буква обозначения *S* не совпадает ни с одним из дополнительных обозначений измеряемой величины, и, следовательно,

соответствует единственному функциональному признаку: это измеритель температуры с контактным устройством, установленный по месту.

**Рисунок 2, б** – вторая буква обозначения **D** совпадает с дополнительным обозначением измеряемой величины, следовательно, только третья и четвертая буквы обозначения соответствуют функциональным признакам: это измеритель перепада давления с контактным устройством и сигнализацией, установленный на щите, например: дифманометр, контактный, сигнализирующий.

**Рисунок 2, в** является обозначением автоматического регулятора, т.к. среди указанных функциональных признаков есть буква **C**: это автоматический регистрирующий регулятор температуры, установленный на щите, например: потенциометр.

Кроме основного перечня обозначений функциональных признаков ТСА, приведенного выше, ГОСТ предусматривает возможность использования дополнительных обозначений:

- чувствительный элемент (первичный датчик, сенсор);
- нормирующий преобразователь (дистанционная передача сигнала);
- дистанционное управление (кнопочный пульт);
- преобразование сигнала по заданному алгоритму (вычисление).

**В обозначениях с указанием функционального признака из дополнительного перечня всегда используется только одна из дополнительных букв.**

В ряде случаев кроме последовательности буквенного обозначения, записываемой внутри графического изображения ТСА, используют дополнительный элемент обозначения: надстрочный и/или подстрочный символ, изображаемый **рядом с графическим изображением** (рисунок 3).

Варианты использования дополнительного элемента:

1) в обозначениях с функциональными признаками из **основного перечня** для указания предельного значения измеряемых величин:

**H** – верхний предел;

**L** – нижний предел;

2) в обозначениях с функциональным признаком из **дополнительного перечня** для указания:

операции вычислительного устройства:

**k** – умножение на постоянный коэффициент;

**Σ** – суммирование;

**max** – ограничение верхнего значения и т.д.);

рода сигнала:

*E* – электрический;  
*P* – пневматический;  
*G* – гидравлический;  
 формы сигнала:  
*A* – аналоговый;  
*D* – дискретный;

3) в обозначениях измерения концентрации для конкретизации измеряемого вещества, например,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $pH$ ,  $H_2$  и т.д.

На рисунке 3 приведены примеры обозначения ТСА на чертежах.

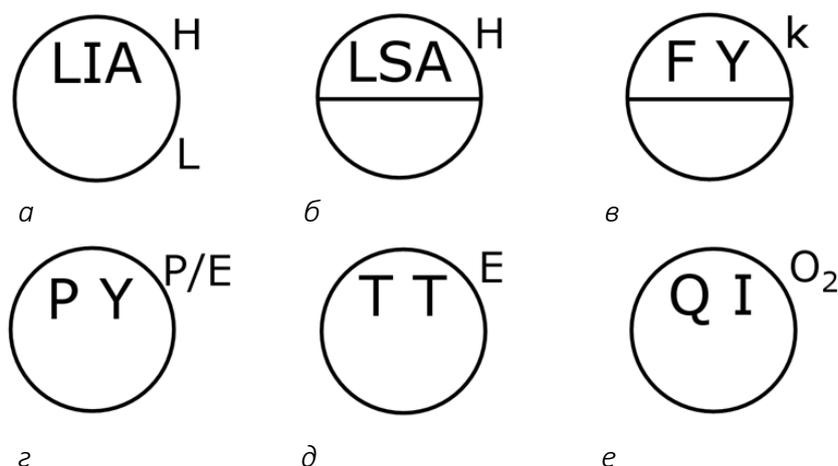


Рисунок 3. – Примеры обозначений ТСА с дополнительными элементами

Рисунок 3, *a* – условное обозначение измерителя уровня, установленного по месту, с индикацией и сигнализацией верхнего и нижнего значений.

Рисунок 3, *б* – условное обозначение измерителя уровня, установленного на щите или пульте управления, с контактным устройством и сигнализацией, например, реле уровня, используемого для формирования сигнала блокировки подачи и сигнализации достижения уровнем верхнего предельного значения.

Рисунок 3, *в* – вычислительный преобразователь, установленный/на щите, выполняющий функцию умножения величины расхода на коэффициент *k*.

Рисунок 3, *г* – преобразователь результата измерения давления, установленный по месту, у которого входной сигнал – пневматический, а выходной – электрический.

**Рисунок 3, д** – бесшкальный (без индикации показаний) измеритель температуры, установленный по месту, с дистанционной передачей показаний в виде электрического сигнала, например, термомпара с унифицированным выходом.

**Рисунок 3, е** – приведено обозначение датчика концентрации кислорода, установленного по месту, с индикацией результата контроля, например, газоанализатора контроля содержания кислорода в дымовых газах.

При изображении на схемах автоматизации замкнутых контуров управления следует придерживаться следующего порядка: каждый контур начинается с обозначения датчика контролируемой величины, проходит через изображение ТСА с обозначением регулятора (в обозначении обязательно имеется буква «С») или релейного переключателя (в обозначении есть буква «S») и заканчивается на приводе регулирующего органа (исполнительного механизма).

При изображении контура регулирования допускается подвод линий связи к символу ТСА изображать **в любой точке окружности** – сверху, снизу или сбоку.

Для удобства чтения схемы автоматизации **линия связи с датчиком**, входящая **в обозначение регулятора сверху**, отображает связь с измерительным прибором, на основании показаний которого регулятор вырабатывает команду управления для исполнительного органа.

**Линия передачи команды управления** изображается выходящей из графического обозначения регулятора **снизу или сбоку** и заканчивается на обозначении исполнительного механизма.

Примеры изображения схем АСУ ТП с использованием этой системы обозначений показаны на рисунках 4–8.

## 2 Классификационные признаки АСУ ТП

Все основные признаки классификации схемы АСУ ТП вносятся в таблицу по форме таблицы 2.

В таблице предусмотрен столбец детализации (уточнения) классификационного признака разрабатываемой АСУ ТП.

Таблица 2

Классификационный признак	Классификация	Детализация признака
Управляемая величина		
Управляющее воздействие		
Принцип управления		
Наличие статической ошибки управления		
Цель управления: характер изменения $x(t)$		
Принцип формирования сигналов управления		
Число контуров		
Характер зависимости $y=f(x)$		

**Первый признак – управляемая величина** указана в задании на выполнение практической работы.

**Второй признак – управляющее воздействие** выбирается самостоятельно студентом и обычно является активным воздействием на технологический процесс в объекте: изменением расхода теплоносителя, топлива, перекачиваемой среды (воды, воздуха, химического реагента и т.д.).

В качестве исполнительного механизма могут быть использованы регулирующие клапана, задвижки, приводные электродвигатели с регулируемым числом оборотов и т.д. Наименование исполнительного механизма вносится в столбец «детализация признака».

**Третий признак – принцип управления.** Принцип управления является фундаментальным признаком формирования схемы АСУ ТП.

Всего существует три принципа формирования схемы АСУ:

- **принцип разомкнутого управления;**
- **принцип управление по отклонению регулируемой величины от заданного значения с целью устранения этого отклонения;**
- **принцип управление по возмущению.**

Поясним основной смысл принципов управления.

Сущность **принципа разомкнутого управления** состоит в том, что управление строится только на основе заданного алгоритма функционирования и не контролируется по фактическому значению управляемой величины, то есть текущее состояние объекта управления не учитывается при выработке управляющих воздействий (замкнутых контуров управления нет).

Схема такой АСУ показана на рисунке 4.

В настоящее время такой принцип управления используется редко.

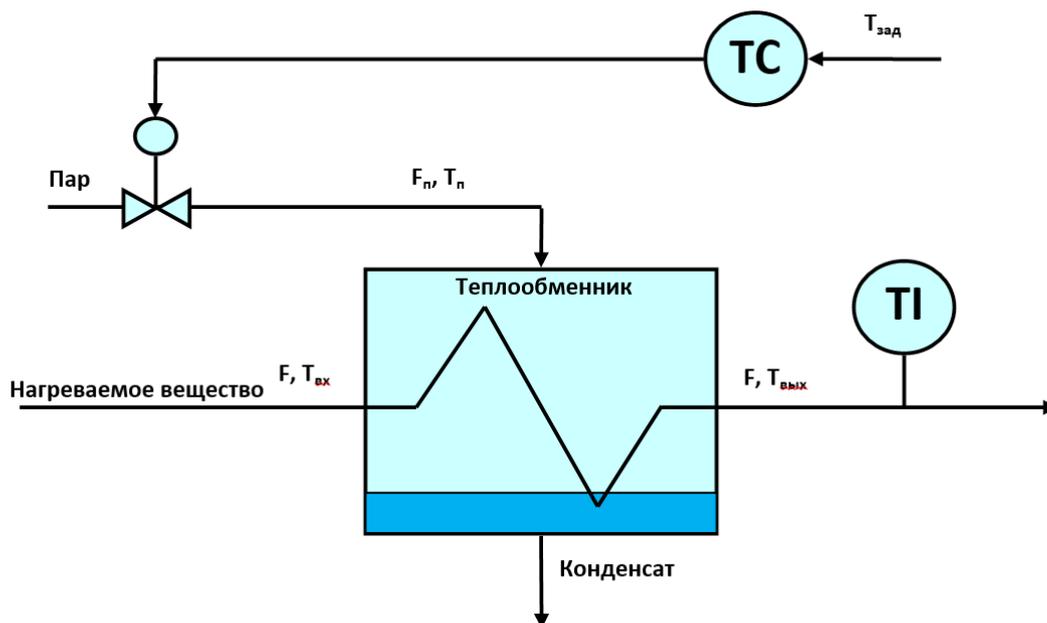


Рисунок 4. – Функциональная схема разомкнутой АСУ

При реализации **принципа управления по отклонению** управляющее воздействие на объект управления вырабатывается как функция отклонения текущего значения управляемой величины  $y(t)$  от ее заданного значения  $y_{зад}(t)$ , которое определяется задающим воздействием:

$$y_{зад}(t) = k \cdot x(t),$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности между величиной задающего воздействия  $x(t)$  и заданным значением управляемой величины  $y_{зад}(t)$ , равный коэффициенту статического преобразования АСУ.

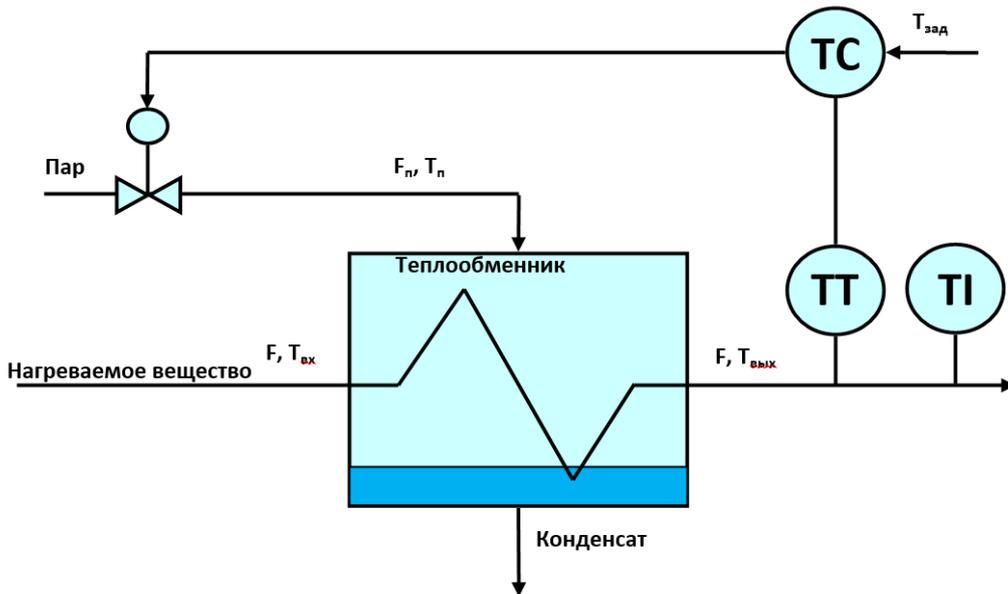
Схема управления (рисунок 5) содержит обратную связь, т.е. управляемая величина с выхода системы подается на ее вход.

Структурная схема системы является замкнутой. В регуляторе системы производится определение величины **рассогласования  $\varepsilon(t)$**  между заданным и действительным значением управляемой величины:

$$\varepsilon(t) = y_{зад}(t) - y(t) = k \cdot x(t) - y(t).$$

Обратная связь такого типа называется **отрицательной (т.к. в уравнении знак минус)**, а управление по отклонению работает таким образом, чтобы все время сводить это рассогласование к нулю.

К достоинствам АСУ по отклонению относятся простота технической реализации, высокая точность управления и отсутствие статической ошибки управления.



$x(t) = T_{зад}$  – заданное значение температуры вещества на выходе;  
 $y(t) = T_{вых}(t)$  – измеренное значение температуры на выходе;  
 $\epsilon(t) = \Delta T = T_{зад} - T_{вых}(t)$  – величина временного рассогласования

Рисунок 5. – Функциональная схема АСУ по отклонению регулируемой величины

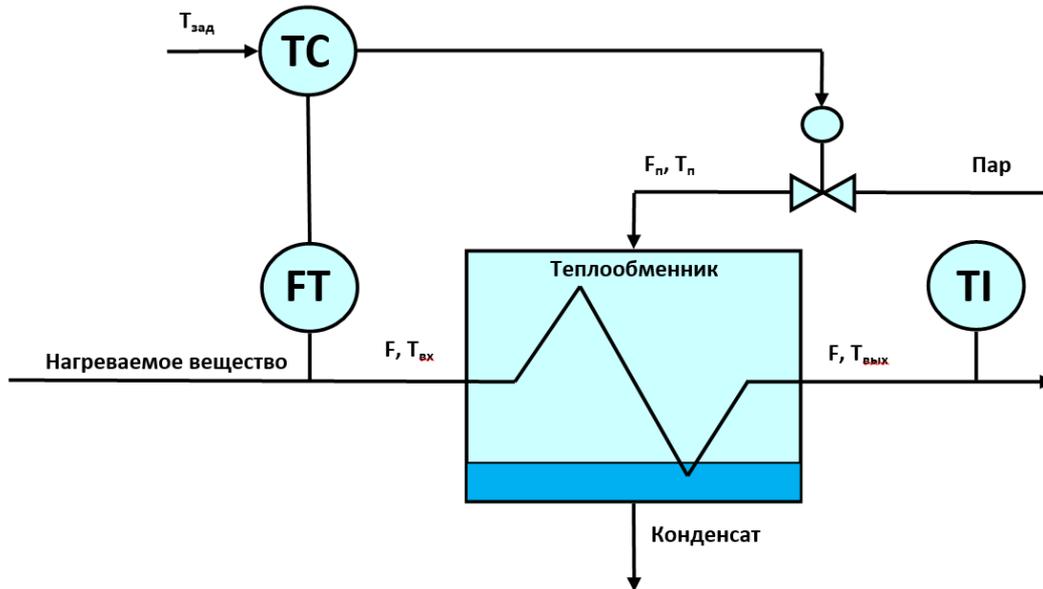
Сущность **принципа управления по возмущению** состоит в том, что измеренное датчиком возмущение (т.е. не прямое воздействие, а постороннее влияние на технологический процесс, например, изменение расхода нагреваемого вещества или его входной температуры) преобразуется в воздействие, подаваемое на устройство управления. Этот сигнал формирует в устройстве управления ТС управляющее воздействие  $z(t)$  с учетом не только заданной величины  $x(t)$ , но и величины регистрируемого возмущения  $f(t)$ . В результате управляющее воздействие на объект управления компенсирует (предотвращает) влияние данного возмущения на управляемую величину  $y(t)$ .

Схема АСУ по возмущению приведена на рисунке 6.

Принцип управления по возмущению ориентирован не на следствие регулирующего воздействия, как принцип обратной связи, а на причину, нарушающую равновесие объекта управления, т.е. основное возмущающее воздействие. В этом заключается его преимущество.

Но применение рассмотренной схемы возможно только в случае жесткой стабилизации всех остальных параметров, кроме расхода  $F$ , т.е. гарантировано отсутствие возмущений по входной температуре

нагреваемой воды  $T_{вх}$  и входной температуре греющего пара  $T_n$  – эти параметры должны быть гарантированно постоянными. Непостоянство этих параметров приводит к росту статической ошибки управления (отличию выходной температуры нагреваемой среды  $T_{вых}$  от заданной  $T_{зад}$ ), что является его недостатком.



$x(t) = T_{зад}$  – заданное значение температуры вещества на выходе;  
 $y(t) = T_{вых}(t)$  – ожидаемое значение температуры на выходе;  
 $f(t) = F(t)$  – измеренное значение расхода нагреваемого вещества на входе в теплообменник (**компенсируемое возмущение**)

Рисунок 6. – Функциональная схема АСУ компенсации возмущения

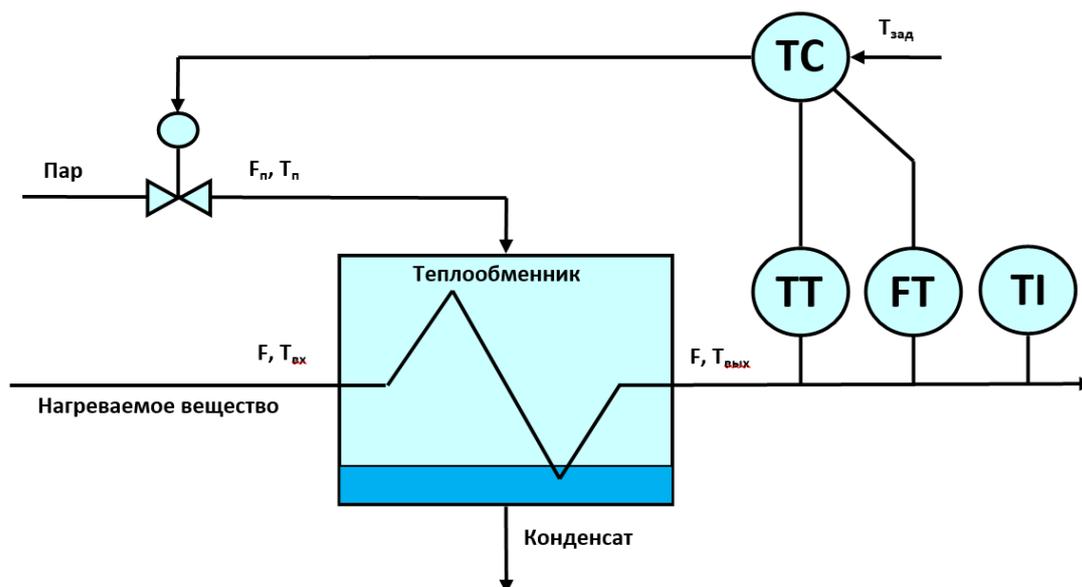
Но существенное улучшение качества управления в условиях действия различных возмущений может быть достигнуто только с использованием **комбинированного управления**.

Для реализации комбинированного управления используется несколько контуров и один из них контур по отклонению регулируемой величины.

В системах комбинированного управления на вход управляющих устройств, помимо рассогласования, вычисляемого по задающему воздействию и сигналу обратной связи, поступает сигнал, получаемый путем измерения возмущающих воздействий.

Обычно в комбинированных схемах измеряется, и, соответственно, компенсируется, только основное возмущение.

На рисунке 7 показан пример комбинированной системы АСУ.



$x(t)=T_{зад}$  – заданное значение температуры вещества на выходе;  
 $y(t)=T_{вых}(t)$  – измеренное значение температуры на выходе;  
 $\varepsilon(t)=\Delta T=T_{зад}-T_{вых}(t)$  – величина временного рассогласования;  
 $f(t)=F(t)$  – измеренное значение расхода нагреваемого вещества  
 (компенсируемое возмущение)

Рисунок 7. – Функциональная схема комбинированной (многоконтурной) АСУ

Четвертый признак – наличие статической ошибки управления.

У статических АСУ при постоянном задающем воздействии ошибка управления стремится к постоянному значению, зависящему от величины возмущения, т.е. после завершения переходного процесса имеет место статическая ошибка управления – это постоянное отклонение регулируемой величины от заданного значения.

Статическая ошибка будет появляться всегда, если в АСУ нет контура регулирования по отклонению регулируемой величины (т.е. контура с отрицательной обратной связью)!

Пятый признак – цель управления: характер изменения  $x(t)$ .

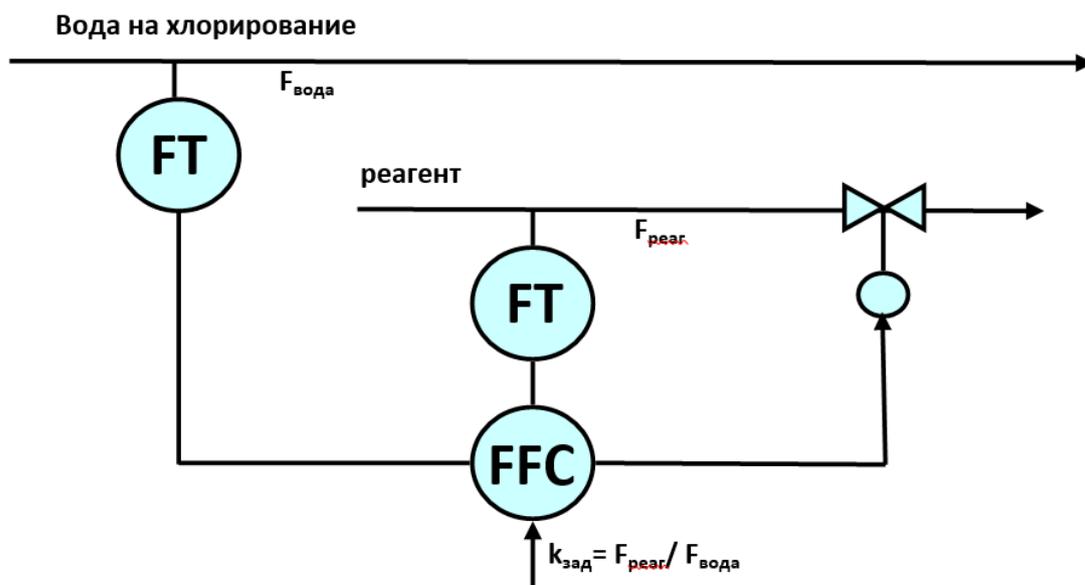
В зависимости от характера изменения задающего воздействия  $x(t)$  системы управления делятся:

- 1) на **обычные** АСУ, к которым относятся (детализация признака):
  - АСУ автоматической стабилизации;
  - АСУ программного регулирования;
- 2) **следящие** АСУ.

В обычных АСУ значение или закон изменения задающего воздействия  $x(t)$  заранее известны, заданы, а целью управления является обеспечение соответствующего значения или закона изменения управляемой величины  $y(t)$ , например, погодного графика температуры.

В системах **автоматической стабилизации** задающее воздействие представляет собой постоянную величину. Областью применения таких АСУ являются непрерывные технологические процессы, в которых управляемый параметр нужно поддерживать постоянным.

В системах **программного управления** задающее воздействие является заранее известной функцией какого-то параметра (времени, температуры и т.д.), изменяющейся по закону, заданному программой. Такие системы оснащаются программными задатчиками, формирующими задающее воздействие, изменяющееся во времени или от значения температуры окружающего воздуха. Область применения программных АСУ: управление периодическими процессами.



$x(t) - k_{зад} = F_{реаг.}/F_{вода}$  – заданное соотношение расходов;

$y(t) = F_{реаг.}(t), F_{вода}(t)$  – измеренные значения расходов;

$\varepsilon(t) = \Delta k = k_{зад} - F_{реаг.}(t)/F_{вода}(t)$  – величина временного рассогласования.

Рисунок 8. – Функциональная схема следящей АСУ

Особой разновидностью АСУ являются **следящие системы**, в которых задающее воздействие представляет собой неизвестную заранее функцию, связанную с внешним, по отношению к системе управления параметром,

который может изменяться случайным образом, а целью управления является воспроизведение этого случайного закона управляемой величиной  $y(t)$ .

Такие АСУ применяются для управления одним технологическим параметром (*ведомым*) в зависимости от значения другого технологического параметра (*ведущего*), изменяющегося произвольно – например, управление расходом воздуха, подаваемого в топку, в зависимости от расхода топлива или подача реагента в заданной пропорции от расхода основного потока обрабатываемой среды.

Пример **следающей** АСУ соотношением расходов показан на рисунке 8.

**Шестой признак – по принципу формирования сигналов управления** различают следующие разновидности АСУ:

1) АСУ с **непрерывным (аналоговым) управлением**, в которых сигналы управления  $x(t)$ ,  $\varepsilon(t)$  или  $z(t)$  представляют собой непрерывную функцию времени. Обычно это чисто механические системы АСУ (мембранные газовые редукторы, термостаты и т.д.);

2) АСУ с **дискретным управлением**, в которых сигнал управления на любом ограниченном временном интервале может иметь конечное, фиксированное число состояний.

АСУ с **дискретным управлением** делятся на **цифровые, импульсные и релейные** (детализация признака).

В **цифровых** АСУ используется дискретное преобразование первичного непрерывного сигнала в цифровой вид в специальных аналогово-цифровых преобразователях для передачи его в вычислительные устройства верхнего уровня – контроллеры АСУ.

В **импульсных** АСУ используется квантование по времени, т.е. замена непрерывного сигнала управления на импульсное воздействие на орган управления (исполнительный механизм).

В **релейных** АСУ управляющее воздействие формируется с использованием релейных схем, у которых при непрерывном изменении входной величины регулирующей орган занимает ограниченное число положений. У такого регулятора, в зависимости от знака и величины задающего воздействия, регулирующей орган или полностью открыт (приток вещества или энергии максимальный), или полностью закрыт (приток вещества или энергии равен нулю).

Примерами двухпозиционных устройств являются электроконтактный термометр, пневматическое реле и т.п.

### **Седьмой признак – число контуров управления.**

Данный классификационный признак характеризует структурную сложность АСУ. В соответствии с ним АСУ делятся на **одноконтурные** и **многоконтурные**.

В **одноконтурных** АСУ управляющее воздействие является функцией единственного контролируемого параметра – управляемой величины в АСУ по отклонению или возмущения в АСУ по возмущению. Соответственно структура АСУ имеет единственный контур общей обратной связи или контур компенсации.

**Многоконтурные** АСУ имеют несколько независимых или связанных контуров управления, реализованных, например, с использованием местных обратных связей по параметрам, реагирующим на изменение управляющих воздействий быстрее, чем управляемая величина.

Использование многоконтурного связанного регулирования позволяет улучшить качественные характеристики управления.

Пример многоконтурной АСУ приведен на рисунке 7.

Схема АСУ, изображенная на рисунке 8, не может рассматриваться в качестве многоконтурной, т.к. в данном случае контролируемый параметр всего один – соотношение расходов.

### **Восьмой признак – по характеру зависимости $y = f(x)$**

По этому признаку АСУ делятся на **линейные** и **нелинейные**.

Строго говоря, практически все реализуемые системы являются нелинейными. Однако, во многих случаях нелинейность рабочей характеристики системы является несущественной, и система может рассматриваться как **линейная**.

В системах, обладающих **существенной нелинейностью**, для достижения требуемого качества управления необходимо учитывать нелинейность объекта управления и использовать нелинейные управляющие устройства. Иногда диапазон регулирования, обладающий существенной нелинейностью, разбивают на несколько поддиапазонов с линейными характеристиками регулирования, например, АСУ регулирования *pH*.

**Все релейные АСУ являются нелинейными!**

### 3 Техническое задание на проектирование АСУ ТП

Форма технического задания представлена в таблице 3.

Сюда вносятся параметры не только проектируемых АСУ ТП, но и различных контуров блокировки и защиты, которые сами по себе системами автоматического регулирования не являются.

Форма имеет несколько разделов:

**Раздел 1 – столбец 2.** Сюда вносится полное наименование параметра, регулируемого системой АСУ или контролируемого системой защиты, а также указывается используемая единица измерений для этого параметра.

**Раздел 2 – столбцы 3–7.** Характеристика АСУ ТП.

– Для системы АСУ стабилизации в столбцы 3–5 вносятся конкретные заданные значения стабилизируемого параметра и пределы отклонений.

– Для АСУ программного регулирования ставится пометка (крестик), а алгоритм изменения параметра описывается в тексте пояснительной записки.

– Для следящей АСУ в столбце 7 ставится пометка, а значение параметра указывается в столбце 2.

**Раздел 3 – столбцы 8, 9.** Используется только для систем блокировки и защиты. Здесь указываются заданные предельные значения защиты.

**Раздел 4 – столбцы 10, 11.** Здесь указывается регулирующее или блокирующее воздействие и тип исполнительного механизма.

**Раздел 5 – столбцы 12–15.** Пометками задаются дополнительные функции АСУ: суммирования, индикации, регистрации и сигнализации.

В таблице ТЗ на АСУ ТП для примера приведены характеристики АСУ ТП.

Под номером 1 системы АСУ стабилизации температуры нагреваемой воды, схема которой показана на рисунках 4–7. Здесь следует отметить, что принцип регулирования в таблице ТЗ не конкретизируется – для этого используется таблица классификационных признаков.

Под номером 2 следящей АСУ ТП подачи реагента, схема которой приведена на рисунке 8.

Дополнительные функции, указанные в столбцах 12–15 таблицы 3, реализуемые АСУ ТП, должны указываться в обозначении регулятора на чертеже согласно ГОСТ 21.404-85. Тогда регулятор температуры согласно данным таблицы ТЗ на рисунках 4–7 будет обозначаться не как ТС, а как TRC, а регулятор следящей АСУ (см. рисунок 8) как FFIRCA.

Таблица 3

№	Регулируемый или блокируемый параметр [ед. изм.]	Тип АСУ ТП					Система блокировки (защиты)		Управляющее воздействие	Регулирующий орган	Дополнительные функции			
		автоматической стабилизации			программного регулирования	следеющая АСУ	Min	Max			Q	I	R	A
		заданное значение	Min	Max										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1. Система регулирования температуры подогреваемой питательной воды														
1.1	Температура воды, °С	185	180	190	-	-	-	-	регулирование подачи пара	дроссельный клапан	-	-	+	-
2. Система подачи коагулянта (декарбонизатора)														
2.1	Соотношение расходов 1:100	-	-	-	-	+	-	-	регулирование подачи коагулянта	дроссельный клапан	-	+	+	+

#### 4 Пример выполнения практической работы

Таблица 4. – Вариант задания на практическую работу № xx

№ варианта	Объект управления	Цель управления	Регистрируемые параметры
XX	Система подачи пара на пароподогреватель питательной воды	Обеспечение заданной температуры питательной воды после подогревателя	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Температура пара перед подогревателем.</li> <li>2. Расход пара.</li> <li>3. Давление пара.</li> <li>4. Температура питательной воды до подогревателя.</li> <li>5. Температура питательной воды после подогревателя.</li> <li>6. Расход питательной воды на подогреватель.</li> <li>7. Уровень конденсата в подогревателе</li> </ol>

#### Общее описание технологической схемы объекта управления

Рассмотрим схему парожидкостного теплообменника (рисунок 9).

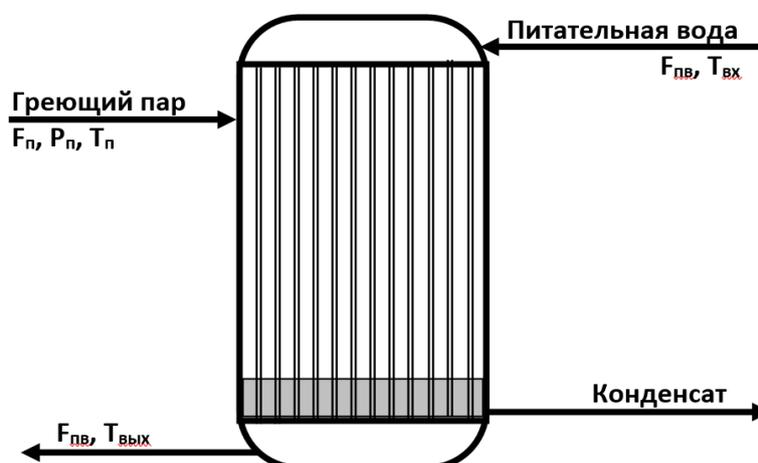


Рисунок 9. – Структурная схема подогревателя питательной воды

Входной поток питательной воды, характеризуемый величиной расхода на подаче в теплообменник  $F$  и входной температурой  $T_{вх}$ , подается в теплообменник, где происходит его нагрев до заданной температуры паром. Поток пара, подаваемого в теплообменник характеризуется расхо-

дом  $F_n$  и температурой  $T_n$ . В процессе теплопередачи пар конденсируется. Конденсат полностью или частично отводится из теплообменника.

Целью управления является обеспечение заданного постоянного значения температуры выходного потока питательной воды  $T_{вых}$ .

Управляемым параметром, согласно заданию, является температура питательной воды на выходе из подогревателя высокого давления (ПВД). Таким образом назначение системы автоматизированного управления – **стабилизация** этой температуры в пределах возможных отклонений подачи и температуры питательной воды на входе в подогреватель.

Возмущающим воздействием является расход питательной воды и его температура на входе в подогреватель, которые могут изменяться произвольным образом в зависимости от паровой нагрузки котла. Изменение этих величин необходимо компенсировать за счет подачи дополнительного количества греющего пара, поступающего на подогреватель.

Регулирующим воздействием в данной ситуации лучше всего выбрать изменение величины открытия редукционного клапана, установленного на паровой магистрали подачи греющего пара в подогреватель.

В качестве регулирующего органа лучше всего использовать настраиваемый программируемый логический контроллер (ПЛК), реализующий ПИД-закон регулирования степени открытия редукционного клапана, т.е. реагирующий не только на величину отклонения параметра от заданной величины, но и на скорость изменения этого отклонения.

Управление температурой выходного потока питательной воды реализовано следующим образом: на ПЛК поступают данные контроля текущего значения температуры выходного потока, полученные с использованием датчика температуры с унифицированным (нормированным) выходным сигналом. ПЛК сравнивает текущую измеренную температуру с заданным значением, и, в зависимости от знака отклонения, а также скорости изменения этого рассогласования, вырабатывает сигнал управления на изменение положения регулирующего органа – клапана в линии подачи пара.

В результате расход пара, подаваемого в теплообменник, уменьшается или увеличивается.

Использование ПЛК-контроллера позволяет достаточно просто выполнить настройку системы автоматизированного управления:

– начальные значения коэффициента усиления, а также значения временных констант интегрирования и дифференцирования можно полу-

чить после анализа кривой выбега при единичном (ступенчатом) изменении величины подачи пара на ПВД на оптимальном режиме работы установки;

– дальнейшее уточнение параметров регулятора можно выполнить в автоматизированном режиме «автонастройка ПИД».

Кроме перечисленного ПЛК-контроллер может выполнять функцию регистратора всех перечисленных в задании технологических параметров, которые, при необходимости, можно выводить на дисплей контроллера или передавать на верхний уровень (ПЭВМ дежурного машиниста).

Регулирование (автоматическая стабилизация температуры выходного потока) реализована на одном контуре с использованием отрицательной обратной связи от датчика температуры питательной воды после ПВД.

В принципе можно было бы добавить еще контур управления по возмущающему воздействию – отклонению температуры питательной воды на входе в ПВД от заданной, а также контур по возмущающему воздействию – отклонению расхода питательной воды от заданного. Это повысило бы качество регулирования технологического процесса. Однако заданием это не предусмотрено. Поэтому ограничимся одним контуром управления, который построен по отклонению регулируемой величины – температуры питательной воды на выходе из теплообменника.

Функциональная схема такого регулятора показана на рисунке 10.

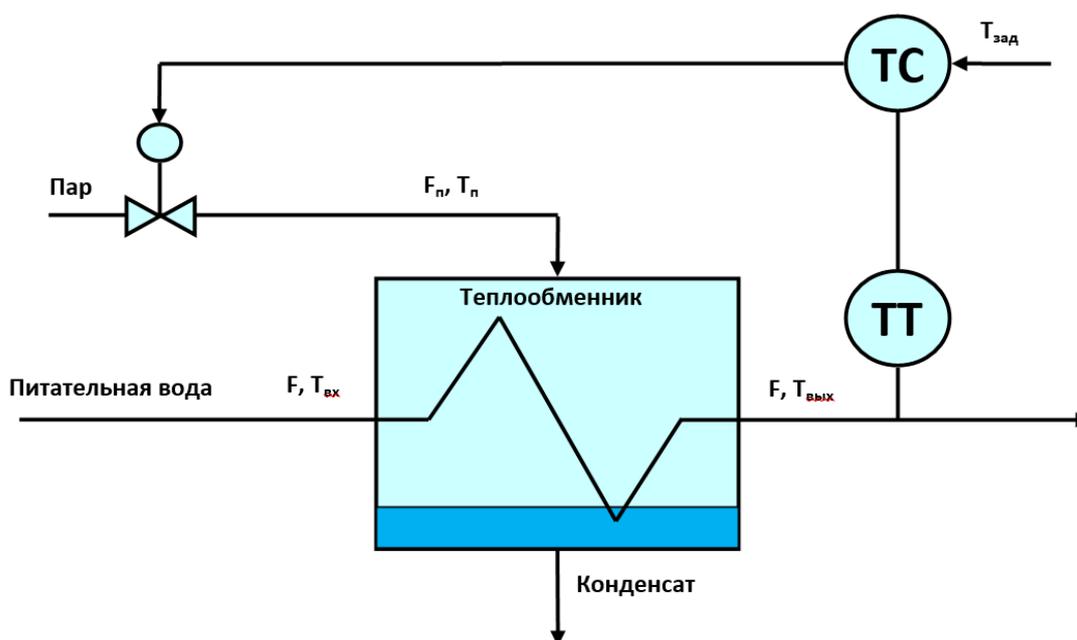


Рисунок 10. – Функциональная схема автоматического регулятора

Функция регулирования в буквенном обозначении регулятора согласно ГОСТ 21.404-85 отображается функциональным признаком С.

Кроме функции автоматического регулирования контроллер осуществляет регистрацию измерения температуры (функциональный признак R), а также сигнализацию достижения предельных значений температуры (верхнего или нижнего предела) (функциональный признак А) с использованием сигнальных светодиодных индикаторов или электрических ламп.

За основу построения функциональной схемы АСУ ТП парожидкостного кожухотрубчатого теплообменника возьмем схему, изображенную на рисунке 5.

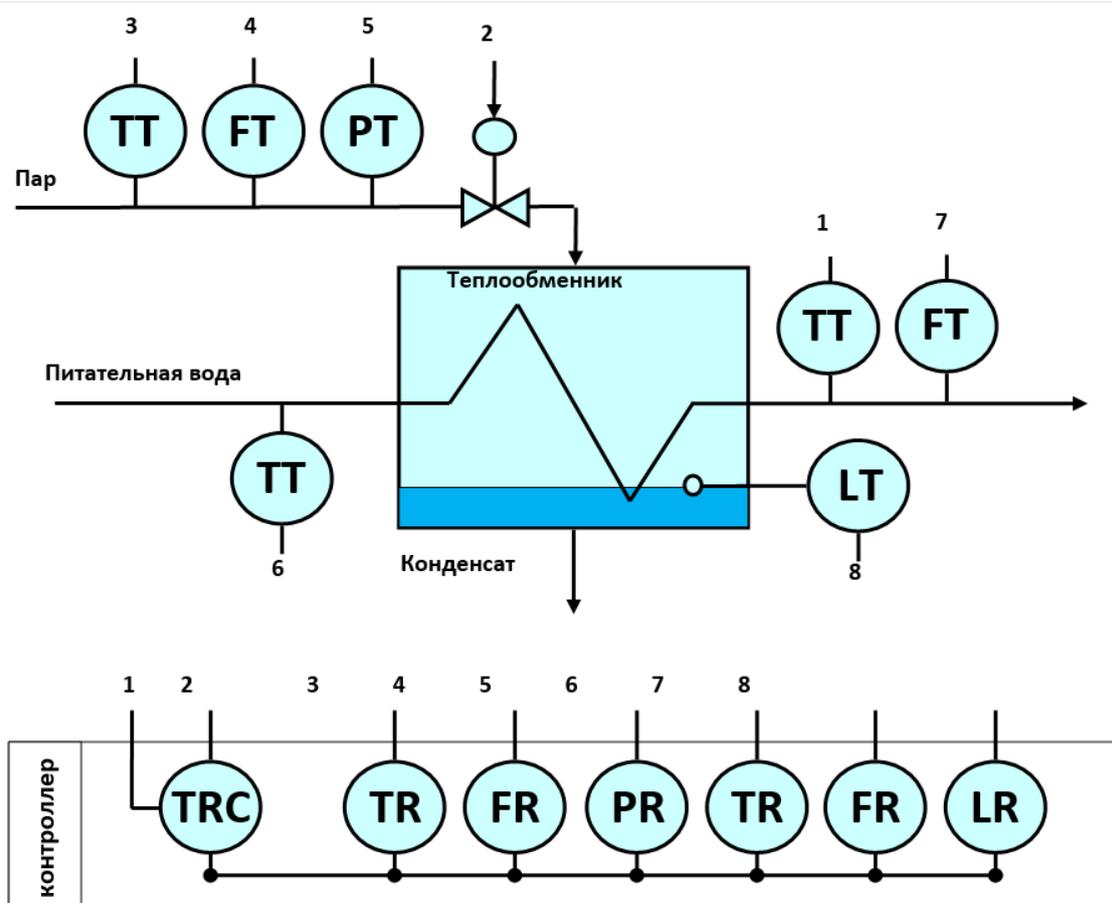
На основании анализа структурной схемы регулирования построим таблицу классификационных признаков АСУ

Таблица 5. – Таблица классификационных признаков

Классификационный признак	Классификация АСУ	Детализация Классификационного признака
Управляемая величина	Температура питательной воды на выходе из подогревателя	–
Управляющее воздействие	Изменение расхода греющего пара на подогреватель	–
Принцип управления	По отклонению	По скорости изменения отклонения
Характер изменения ошибки управления	Астатическая	–
Характер изменения задающего воздействия (цель управления)	Автоматической стабилизации	–
Принцип формирования сигналов управления	Дискретного управления	Цифровая АСУ ТП (используется ПЛК-контроллер)
Число контуров управления	Один	Контур отрицательной обратной связи
Характер зависимости управляемых переменных от входных воздействий	Линейный	–

Введем в разработанную нами схему АСУ ТП заданные контрольно-измерительные приборы и контроллер управления.

Таблица ТЗ на проектирование заданной АСУ ТП с записью под номером (1.1) показана на с. 107 данных методических указаний (таблица 3).



На этом этапе задание можно считать выполненным.

### 5 Индивидуальные задания по практической работе

Вариант задания выбирается из таблицы 6 по порядковому номеру в списке группы.

Таблица 6. – Варианты задания по практической работе

№ варианта	Объект управления	Цель управления	Регистрируемые параметры
1	2	3	4
1	Система подачи воды из скважины	Обеспечение заданного минимального уровня воды в скважине	1. Уровень воды в скважине. 2. Температура воды. 3. Счетчик расхода воды. 4. Сигнализация по верхнему и нижнему пределу уровня

1	2	3	4
2	Бак системы водоподготовки	Обеспечение заданного значения pH в баке	1. Расход воды. 2. Температура в баке. 3. Расход реагента. 4. Контроль уровня и сигнализация предельных значений
3	Бак системы водоподготовки	Обеспечение заданного соотношения подачи реагента по отношению к подаче воды в бак	1. Давление в трубопроводе подачи воды. 2. Температура воды. 3. Расход обработанной воды. 4. Контроль уровня
4	Бак системы водоподготовки	Компенсация расхода обработанной воды на потребители	1. Расход воды на обработку. 2. Расход реагента. 3. Концентрация pH в баке. 4. Температура воды в баке
5	Бак системы водоподготовки	Обеспечение заданного уровня воды в баке расходом воды на притоке	1. Расход воды из бака. 2. Содержание pH в баке. 3. Водосчетчик на стоке. 4. Температура в баке
6	Бак водонапорной башни	Обеспечение заданного объема воды в баке	1. Расход воды на потребителей. 2. Счетчик воды на потребителей. 3. Сигнализатор предельных уровней в баке. 4. Расход воды на притоке
7	Бак системы водоподготовки	Обеспечение заданного уровня в баке за счет компенсации изменения притока воды в бак	1. Уровень воды в баке. 2. Расход обработанной воды. 3. Давление воды в баке. 4. Температура обработанной воды
8	Бак системы водоподготовки	Обеспечение заданного расхода воды на потребители за счет изменения частоты вращения циркуляционного насоса	1. Температура воды на потребителей. 2. Давление воды на потребителей. 3. Счетчик расхода воды. 4. Уровень воды в баке.

1	2	3	4
9	Насосная станция	Обеспечение заданного давления в циркуляционном трубопроводе	1. Давление в напорном трубопроводе. 2. Температура воды. 3. Расход воды. 4. Счетчик воды
10	Повысительная насосная станция	Обеспечение заданного расхода в циркуляционном трубопроводе	1. Давление воды в подпиточном трубопроводе. 2. Расход воды подпитки. 3. Расход воды в циркуляционной магистрали. 4. Давление в прямой сетевой магистрали
11	Бассейн	Обеспечение заданного уровня воды в бассейне за счет обводной (байпасной) магистрали	1. Давление воды. 2. Температура воды на входе в бассейн. 3. Счетчик расхода воды. 4. Расход воды в байпасной магистрали
12	Фильтрационная установка	Обеспечение заданного перепада давления на фильтре	1. Давление воды до фильтровальной установки. 2. Температура воды. 3. Расход очищаемой воды. 4. Счетчик расхода воды
13	Бассейн-отстойник	Обеспечение заданного уровня воды в бассейне за счет сброса шламовых вод	1. Температура воды в бассейне. 2. Уровень воды в бассейне. 3. Счетчик поступающей воды на обработку. 4. Расход очищенной воды на потребителей
14	Бак смесителя	Обеспечение заданного соотношения подачи реагента по отношению к основному потоку воды за счет изменения частоты вращения привода насоса подачи реагента	1. Уровень воды в смесителе. 2. Температура воды в смесителе. 3. Счетчик подачи реагента. 4. Счетчик подачи воды в смеситель

## Литература

1. Гаврилов, А. Н. Системы управления химико-технологическими процессами : в 2 ч. / А. Н. Гаврилов, Ю. В. Пятаков. – Воронеж : Воронеж. гос. ун-т инженер. технологий, 2014. – Ч. 1. – 220 с. : табл., ил URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=255898>.
2. Молдабаева, М. Н. Автоматизация технологических процессов и производств / М. Н. Молдабаева. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. – 225 с. : ил., табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=564225>.
3. Назаров, В. И. Теория автоматического регулирования теплоэнергетических процессов: практикум / В. И. Назаров. – Минск : Выш. шк., 2015. – 216 с. : ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=459656>.
4. Лубенцов, В. Ф. Теория автоматического управления / В. Ф. Лубенцов, Е. В. Лубенцова. – Ставрополь : СКФУ, 2014. – 143 с. : ил. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=457414>.
5. Целищев, Е. С. Автоматизация проектирования технического обеспечения АСУТП / Е. С. Целищев, А. В. Котлова, И. С. Кудряшов. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. – 197 с. : ил., табл., схем. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=564219>.
6. Трофимов, В. Б. Интеллектуальные автоматизированные системы управления технологическими объектами / В. Б. Трофимов, С. М. Кулаков. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2016. – 232 с. : ил., табл., схем. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=444175>.
7. Владимирова, Т. М. Основы технического регулирования / Т. М. Владимирова. – Архангельск : САФУ, 2015. – 152 с. : ил. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=436499>.
8. Рубан, А. И. Адаптивные системы управления с идентификацией / А. И. Рубан. – Красноярск : Сиб. федерал. ун-т, 2015. – 140 с. : схем. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=435610>.
9. Автоматизация и управление в технологических комплексах / под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Бел. навука, 2014. – 376 с. : ил., табл., схем – (Технологические комплексы: проектирование, производство, применение). – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=330472>.
10. Сергеев, А. И. Программирование контроллеров систем автоматизации / А. И. Сергеев, А. М. Черноусова, А. С. Русяев. – Оренбург : ОГУ, 2017. – 126 с. : схем., табл., ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=481806>.
11. Герасимов, А. В. Проектирование АСУТП с использованием SCADA-систем / А. В. Герасимов, А. С. Титовцев. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2014. – 128 с. : табл., ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=427985>.