

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.»  
Энгельсский технологический институт (филиал)

# **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ по АСУ ТП**

Учебно-методическое пособие  
для студентов направления  
18.03.01 «Нефтегазовое дело»

очной, заочной форм обучения

Энгельс 2024

## **ДВУХПОЗИЦИОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО МАНОМЕТРА**

Цель работы: Исследовать точность работы установки для двухпозиционного регулирования давления воздуха с помощью электроконтактного манометра.

### **Теоретические основы**

По роду измеряемой величины приборы давления подразделяют на следующие виды:

барометры - для измерения атмосферного давления;

манометры - для измерения избыточного давления;

вакуумметры - для измерения разряжения;

мановакуумметры - (тяги напоромеры) - для измерения избыточного давления и разряжения.

дифференциальные манометры - для измерения разности (перепада) давлений.

Наибольшее распространение в практике получили пружинные приборы. Для измерения быстропеременных давлений используются манометры сопротивления, пьезоэлектрические и магнитострикционные, радиоизотопные и ионизационные устройства. Шкалы приборов для измерения давления градуируются в основном в кгс /см<sup>2</sup>, а так же в мм. вод. ст.; мм. рт. ст.; кгс/м<sup>2</sup>. Единицы давления связаны между собой соотношениями: 98066,5 Па = 1 \* 10<sup>4</sup> мм. вод. ст. = 735,56 мм. рт.ст. = 10<sup>4</sup> кгс/м<sup>2</sup> (техническая атмосфера).

Пружинные приборы давления имеют широкое применение, обеспечивают высокую точность измерения, позволяют осуществлять запись и дистанционную передачу показаний.

Мембранные приборы - применяются в основном для измерения небольших давлений и перепадов давления. Чувствительным элементом в данных приборах служат мембранные коробки, внутренние полости которых заполнены жидкостью. Под воздействием разности давлений мембранные коробки деформируются, в результате чего, например, перемещается плунжер индукционной катушки, включенной в дифференциально-трансформаторную схему.

В последнее время все шире применяются приборы давления, построенные на компенсационном принципе. К числу таких устройств относятся дифференциальные манометры типа ДМПК с силовой компенсацией.

## Статистический анализ и оценка погрешностей измерения

Из-за неизбежных погрешностей измерения, результаты ряда наблюдений одной и той же величины отличаются между собой. Точность измерения при наличии рассеяния величин оценивают с помощью вероятностных (статистических) характеристик. Одной из таких характеристик является среднее арифметическое значение  $\bar{X}$  измеряемой величины:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

где  $x_1; x_2; x_3; \dots x_n$  – результаты ряда измерений одной и той же физической величины,  $n$  – число измерений в ряде.

Так как истинное значение измеряемой величины неизвестно, то на практике за истинное значение принимают результат измерения по сравнению с рабочим прибором. Если это невозможно сделать, то за истинное значение измеряемой величины принимают среднее арифметическое  $\bar{X}$ , либо математическое ожидание  $M(x)$  измеряемой величины, которое является пределом при бесконечно большом числе наблюдений.

$$M(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{X} \quad (2)$$

Чтобы оценить точность какого-либо приближенного равенства, например  $\bar{X} \approx M(x)$ , его можно записать в виде:

$$\bar{X} - \varepsilon \leq M(x) \leq \bar{X} + \varepsilon \quad (3)$$

или

$$M(x) = \bar{X} \pm \varepsilon \quad (4)$$

Где  $\varepsilon$  – доверительная погрешность для  $M(x)$ .

Доверительная погрешность  $\varepsilon$ , в пределах которой будет изменяться  $M(x)$ , зависит от заданной доверительной вероятности (надежности)  $\beta$ . При оценке границ доверительного интервала пользуются таблицами распределения Стьюдента. Распределение Стьюдента позволяет оценить надежность  $\beta$  по заданному значению  $\varepsilon$  или, наоборот, по заданной надежности  $\beta$  результата найти значение погрешности  $\varepsilon$ .

Рассеяние значений случайных величин погрешностей характеризуют средним квадратическим отклонением случайной составляющей основной погрешности, определяемой по формуле:

$$S_{\Delta} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{X})^2 + (x_2 - \bar{X})^2 + \dots + (x_n - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (5)$$

Задавая надежность  $\beta$  по таблице 1 находят коэффициент Стьюдента  $t_{\beta}$  для известного числа  $n$  измерений. Коэффициент  $t_{\beta}$  связан с доверительной погрешностью  $\varepsilon$  и средним квадратическим отклонением  $S_{\Delta}$  случайной составляющей основной погрешности соотношением

$$t_{\beta} = \frac{\varepsilon \sqrt{n-1}}{S_{\Delta}} \quad (6)$$

Определив  $t_{\beta}$ , находят доверительную погрешность  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{t_{\beta} S_{\Delta}}{\sqrt{n-1}} \quad (7)$$

Коэффициенты Стьюдента  $t_{\beta}$ .

Таблица 1.

| n-1 | $\beta$ |       |       |
|-----|---------|-------|-------|
|     | 0,90    | 0,95  | 0,98  |
| 1   | 6,31    | 12,70 | 31,80 |
| 2   | 2,92    | 4,30  | 6,96  |
| 3   | 2,35    | 3,18  | 4,54  |
| 4   | 2,13    | 2,78  | 3,75  |
| 5   | 2,02    | 2,57  | 3,36  |
| 6   | 1,94    | 2,45  | 3,14  |
| 7   | 1,89    | 2,36  | 3,00  |
| 8   | 1,86    | 2,31  | 2,90  |
| 9   | 1,83    | 2,26  | 2,82  |
| 10  | 1,81    | 2,23  | 2,76  |
| 15  | 1,75    | 2,13  | 2,60  |
| 20  | 1,72    | 2,09  | 2,53  |

### Основные понятия

*Принцип двухпозиционного регулирования давления воздуха электроконтактным манометром.*

Регулирование давления воздуха в исследуемой установке осуществляется за счет включения и выключения двигателя компрессора при достижении давления соответственно нижнего и верхнего пределов в заданном диапазоне. Управляющий сигнал поступает от контактных групп электроконтактного манометра.

*Устройство и работа электрической части манометра ЭКМ-1У.*

Принцип действия электрической части манометра ЭКМ-1У показан на рис.1. Стрелка 1 связана с чувствительным узлом манометра и, двигаясь относительно шкалы, показывает давление в ресивере (накопительной емкости) установки. Стрелки 2 и 3 показывают соответственно нижний и верхний пределы установки диапазона регулирования давления. Они переставляются специальным ключом. Со стрелками 2 и 3 связаны относительно неподвижные контакты 4 и 5. На стрелке 1 стоит штифт 6,

[illegible]

Контактное устройство манометра включается в электрическую релейную схему управления двигателем компрессора.

Электрическая схема двухпозиционного регулирования давления показана на рис. 2.

5

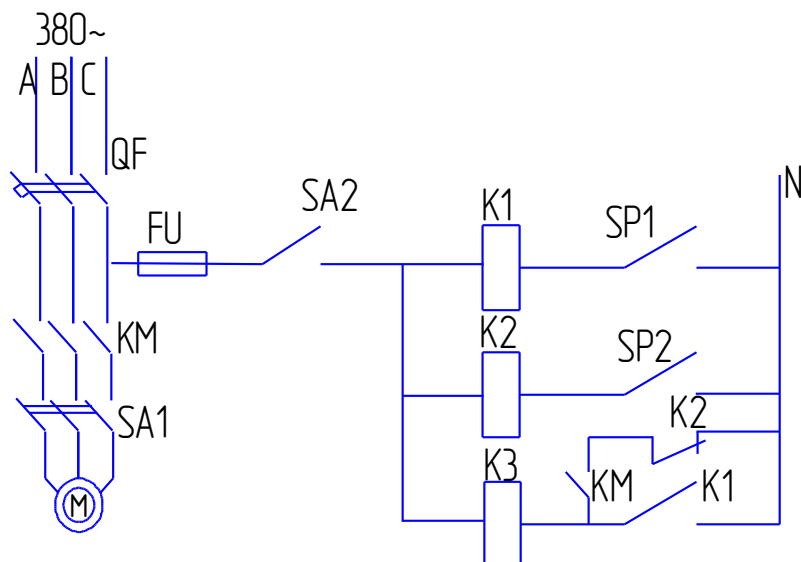


Рис.2.

При достижении верхнего предела замкнется контакт SP2 манометра и ток поступит на катушку реле K2. одновременно разомкнется нормально замкнутый контакт K2, катушка магнитного пускателя обесточится, так как нижний предельный контакт SP1 разомкнут, катушка промежуточного реле K1 обесточена и контакты, замыкающие его, разомкнуты. Двигатель выключается и компрессор остановится. При уменьшении давления до величины нижнего предела система автоматического регулирования снова повторяет свою работу.

## Методика эксперимента

### 1. Оценка точности работы установки.

Точность работы установки компрессора с электроконтактным манометром оценивается сравнением с показаниями образцового неконтактного прибора, включенного параллельно. Если, например,  $x_n$  – нижний предел установки диапазона давления, а  $x_d$  – действительное значение нижнего предела, взятое из показаний образцового прибора, при котором компрессор начинает работать, то абсолютная погрешность системы регулирования равна:

$$\Delta x = x_n - x_d \quad (8)$$

а относительная погрешность соответственно вычисляется:

$$\delta_x = (x_n - x_d) / x_n * 100\% \quad (9)$$

### 2. Оценка точности измерений.

Манометр для измерений с равномерной шкалой, класс точности – 1,6; предел измерения  $0 \div 6$  кгс/см<sup>2</sup>.

Для приборов с равномерной шкалой нормирующее значение  $X_N$  измеряемой величины берется равным пределу измерения по шкале, а класс точности соответствует пределу допускаемой приведенной погрешности  $\gamma$

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\% \quad (10)$$

где  $\Delta$  – предел допускаемой абсолютной погрешности,

$$\text{Отсюда} \quad \Delta = \pm \frac{\gamma \cdot X_N}{100} \quad (11)$$

В нашем случае  $\Delta = \pm \frac{1,6 \cdot 6}{100} = 0,096 \text{ кгс/см}^2 = 0,009408 \text{ МПа}$

Таким образом, точность измерения равна  $X + \Delta = X + 0,06 \text{ кгс/см}^2$

### 3. Устройство технологической установки для получения сжатого воздуха

Технологическая схема установки для получения сжатого воздуха с автоматическим регулированием давления в заданном диапазоне показана на рис. 3. Она включает в себя следующие узлы: 1 – компрессор, 2 – ресивер компрессора, 3 – емкость для сжатого воздуха.

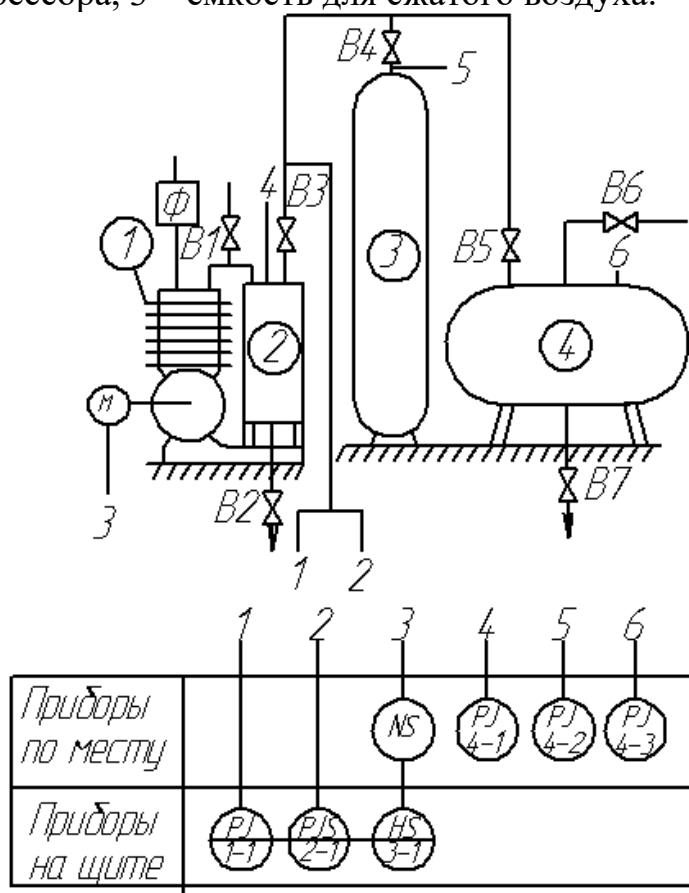


Рис.3. Технологическая схема установки.

Установка снабжена следующими устройствами управления и регулирования: B1 – вентиль выпуска воздуха в атмосферу, B3, B4 – перепускные вентили, B2 – вентиль для слива водяного конденсата.

$\frac{PI}{1-1}$  – Манометр для измерений с равномерной шкалой, класс точности – 1,6; предел измерения  $0 \div 6$  кгс/см<sup>2</sup>.

– манометр электроконтактный типа ЭКМ-1У, диапазон регулирования  $0 \dots 6$  кгс/см<sup>2</sup>, класс точности 2,5.

$\frac{HS}{2-1}$  – тумблер включения (SA2) на щите установки,

$\frac{NS}{3-1}$  – блок электрической схемы автоматики управления двигателем компрессора,

$M$  – двигатель компрессора типа АОЛ2-324, мощность 3 кВт,

$\frac{PJ}{4-1}$ ,  $\frac{PJ}{4-2}$ ,  $\frac{PJ}{4-3}$  – манометры контроля давления в емкостях 2, 3, 4 с диапазоном измерения  $0 \dots 6$  кгс/см<sup>2</sup>, класс точности 2,5 ( $0 \dots 0,588$  МПа)

#### 4. Работа компрессорной установки.

Сжатый воздух после запуска компрессора 1 поступает сначала в ресивер 2, а затем через вентили В3, В4, В5 в расходные емкости 3 и 4.

#### Требования техники безопасности

1. Строго соблюдать порядок включения приборов.
2. Во время работы компрессора следить за показанием образцового манометра. При любом самопроизвольном нарушении режима компрессора нажать на кнопку «Стоп» и доложить преподавателю.

#### Порядок проведения измерений

Проверить точность работы системы регулирования в нескольких диапазонах согласно задания преподавателя. Вычислить абсолютную и относительную погрешности регулирования. Результаты свести в таблицу.

| №<br>п/п | Диапазоны<br>регулирования | $X_n$ | $X_d$ | $\Delta X$ | $\delta_x$ |
|----------|----------------------------|-------|-------|------------|------------|
| 1        | Нижний предел              |       |       |            |            |
|          | Верхний предел             |       |       |            |            |
| 2        | Нижний предел              |       |       |            |            |
|          | Верхний предел             |       |       |            |            |
| 3        | Нижний предел              |       |       |            |            |
|          | Верхний предел             |       |       |            |            |

1. Установить специальным ключом на лицевой части электроконтактного манометра предельные стрелки в соответствии с диапазоном регулирования.

2. Включить выключатель в следующей последовательности:
  - а) пакетный выключатель на щите лаборатории;
  - б) кнопку «Пуск» на выключателе двигателя компрессора;
  - в) тумблер SR2 на щите лабораторной установки поставить на положение «ВКЛ». Двигатель компрессора заработает.
3. После остановки двигателя снять показания образцового прибора, соответствующее верхнему пределу регулирования.
4. Приоткрыв вентиль В1, выпустить воздух, следя за показаниями образцового прибора. При достижении нижнего предела давления двигатель компрессора включится. В этот момент снимаются показания образцового прибора.
5. Аналогичные действия произвести для исследования точности работы установки в следующих заданных диапазонах регулирования.
6. По окончании работы выключить: тумблер SA2, нажать кнопку «Стоп» на выключателе двигателя, пакетный выключатель на щите лаборатории. Приоткрыв вентиль В1, выпустить воздух из емкостей. Проверить нулевое положение стрелок приборов установки.

### **Обработка результатов наблюдений.**

Занести данные измерений в таблицу. По формулам (8) и (9) вычислить абсолютную и относительную погрешности для каждого предела во всех исследованных диапазонах регулирования. Сделать вывод о точности регулирования на различных участках шкалы электроконтактного манометра.

### **Содержание и оформление отчета по работе.**

Отчет должен включать:

1. Название лабораторной работы.
2. Развернутую формулировку цели работы.
3. Схему технологической установки для получения сжатого воздуха.
4. Таблицу с результатами измерений и вычислений.
5. Оценка точности регулирования.

### **Вопросы для самопроверки.**

1. Для измерения каких параметров технологического процесса применяются манометры, мановакуумметры, тягонапоромеры, барометры, вакуумметры?
2. Для определения какой величины необходим коэффициент Стьюдента?
3. Как работает электрическая часть манометра ЭКМ-1У?
4. Расскажите порядок работы электрической схемы?
5. Устройство технологической схемы для получения сжатого воздуха.
6. Поясните обозначения приборов, приведенных на технологической схеме.

**Время, отведенное на лабораторную работу.**

|                                                            |               |
|------------------------------------------------------------|---------------|
| Подготовка к работе                                        | 0,5 акад. час |
| Выполнение работы                                          | 0,5 акад. час |
| Обработка результатов<br>эксперимента и оформление отчетов | 1,0 акад. час |
| Отчет по лабораторной работе                               | 1,0 акад. час |

## Лабораторная работа 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПОКАЗАНИЙ ПРУЖИННЫХ МАНОМЕТРОВ

**Цель работы:** оценить погрешность рабочего прибора путем сравнения его с образцовым прибором. Исследовать вариацию показаний рабочего прибора при прямом и обратном ходе.

#### Основные понятия

##### 1. Единицы давления и приборы для измерения давления

Под давлением в общем случае понимается предел отношения нормального составляющего усилия к площади, на которой действует усилие.

Различают давление абсолютное  $P_a$  и избыточное  $P_{и}$ , которое представляет собой разность между абсолютным  $P_a$  давлением и барометрическим  $P_б$ .

$$P_{и} = P_a - P_б \quad (1)$$

Разрежение  $P_v$  появляется в случае, когда абсолютное давление ниже барометрического, т.е.

$$P_v = P_б - P_a \quad (2)$$

Единицы измерений давления представлены в таблице 1.

Таблица 1

|                           |                           |                                                   |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------|
| Паскаль                   | ПА                        | 1 н/м <sup>2</sup>                                |
| Техническая атмосфера     | ат (кГс/см <sup>2</sup> ) | 1 ат = 9,8066 · 10 <sup>4</sup> н/м <sup>2</sup>  |
| Миллиметр ртутного столба | мм рт. ст                 | 1 мм рт ст = 133,32 н/м <sup>2</sup>              |
| Миллиметр водяного столба | мм вод. ст.               | 1 мм вод ст = 9,8066 н/м <sup>2</sup>             |
|                           | бар                       | 1 бар = 10 <sup>5</sup> н/м <sup>2</sup>          |
| Физическая атм            | атм                       | 1 атм = 1,0132 · 10 <sup>5</sup> н/м <sup>2</sup> |

Приборы для измерения избыточного давления называют манометрами и напоромерами, для измерения вакууметрического давления - мановакууметрами и тягонапоромерами, для измерения разности давлений - дифференциальными манометрами.

##### 2. Поверка рабочего прибора образцовым прибором

Погрешностью измерительного прибора называется разность между его показанием и истинным значением измеряемой величины. Так как величину истинного значения измеряемой величины установить нельзя, в измерительной технике используется так называемое действительное

значение, полученное измерением с наивысшей практически достижимой точностью. Погрешность измерения может быть выражена в виде абсолютной и относительной величины и бывает положительной и отрицательной. Если  $X_{\text{п}}$  - значение измеряемой величины, найденное из показаний рабочего прибора, а  $X_{\text{д}}$  - действительное значение измеряемой величины, найденное из показаний образцового прибора, то разность величин  $X_{\text{п}}$  и  $X_{\text{д}}$  составит абсолютную погрешность в данных измерениях.

$$\Delta X = X_{\text{п}} - X_{\text{д}} \quad (3)$$

Достоинство результата лучше характеризует относительная погрешность, которая показывает величину погрешности по отношению к результату измерения и получается сравнением абсолютной погрешности с самим результатом измерения. Относительная погрешность  $\sigma_x$  равна:

$$\sigma_x = \Delta X / X_{\text{п}} * 100 \% \quad (4)$$

Поправкой  $K$  называется величина численно равная абсолютной погрешности, взятой с обратным знаком, т. е.

$$K = -\Delta X \quad (5)$$

Поправку алгебраически прибавляют к результату.

Вариацией называется наибольшая, полученная экспериментально, разность между многократными показаниями измерительного прибора, соответствующими одному и тому же действительному значению измеряемой величины при неизменных внешних условиях. Появление вариации вызывается трением в механизме прибора, упругим последствием чувствительных элементов прибора. Вариация представляет область, внутри которой могут лежать показания прибора при каждом данном значении измеряемой величины.

### 3. Оценка точности измерений

Образцовый манометр в данной лабораторной работе имеет верхний предел измерения 1,6 кгс/см<sup>2</sup>, класс точности 0,25 и равномерную шкалу (0...0,16 МПа, 0,2,5).

Для приборов с равномерной шкалой нормирующее значение  $X_N$  берется равным пределу измерения по шкале (1).

Класс точности соответствует пределу допускаемой приведенной погрешности  $\bar{\gamma}$ .

$$\bar{\gamma} = \pm \bar{\Delta} / X_N * 100\% \quad (6)$$

где  $\bar{\Delta}$  - предел допускаемой погрешности манометра.

Отсюда

$$\bar{\Delta} = \pm \bar{\gamma} * X_N / 100\% \quad (7)$$

Таким образом, предел допускаемой погрешности образцового манометра равен:

$$\Delta = \pm 0,85 \cdot 1,6 / 100 = \pm 0,004 \text{ (кгс/см}^2\text{)} = \pm 0,00039 \text{ МПа}$$

Цена деления образцового манометра при числе делений  $n=200$  и пределу измерения  $x_{\max} = X_N = 1,6 \text{ кгс/см}^2 = 0,15$

$$C = x_{\max} / n = 1,6 / 200 = 0,008 \text{ (кгс/см}^2\text{)} = 0,000784 \text{ МПа}$$

Следовательно, систематическая неисключенная погрешность образцового прибора может достигать половины цены деления его шкалы.

### Методика эксперимента

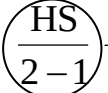
Регулирование давления воздуха в исследуемой установке осуществляется за счет включения и выключения двигателя компрессора при достижении давления соответственно нижнего и верхнего пределов в заданном диапазоне. Управляющий сигнал поступает от контактных групп электроконтактного манометра.

Технологическая схема установки для получения сжатого воздуха с автоматическим регулированием давления в заданном диапазоне показана на рис. 1. Она включает в себя следующие узлы: 1 – компрессор, 2 – ресивер компрессора, 3 – емкость для сжатого воздуха.

Установка снабжена следующими устройствами управления и регулирования: В1 – вентиль выпуска воздуха в атмосферу, В3, В4 – перепускные вентили, В2 – вентиль для слива водяного конденсата.

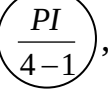
 – Манометр для измерений с равномерной шкалой, класс точности – 1,6; предел измерения  $0 \div 6 \text{ кгс/см}^2$ .

– манометр электроконтактный типа ЭКМ-1У, диапазон регулирования  $0 \dots 6 \text{ кгс/см}^2$ , класс точности 2,5.

 – тумблер включения (SA2) на щите установки,

 – блок электрической схемы автоматики управления двигателем компрессора,

М – двигатель компрессора типа АОЛ2-324, мощность 3 кВт,

 ,  ,  – манометры контроля давления в емкостях 2, 3, 4 с диапазоном измерения  $0 \dots 6 \text{ кгс/см}^2$ , класс точности 2,5 ( $0 \dots 0,588 \text{ МПа}$ ).

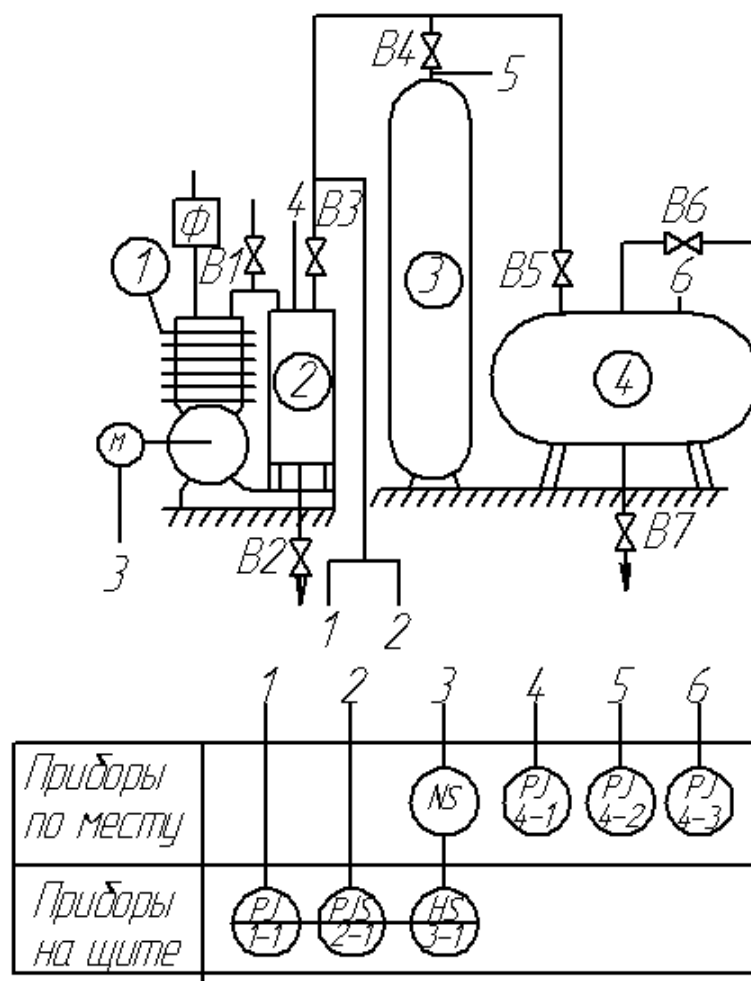


Рис.1. Технологическая схема установки.

Сжатый воздух после запуска компрессора 1 поступает сначала в ресивер 2, а затем через вентили В3, В4, В5 в расходные емкости 3 и 4.

Определение погрешности показаний пружинного рабочего манометра производится согласно ГОСТ 8008-72 на проверку пружинных манометрических приборов методом сравнения его показаний с показаниями образцового прибора. Абсолютная погрешность показаний рабочих приборов, относительная погрешность и вариация определяются при прямом и обратном ходе (давление плавно уменьшается, а затем плавно увеличивается).

Схема установки для определения погрешности пружинных манометров показана на рис. 2. В установке используются следующие приборы и средства регулирования: В1, В2, В3, В4 - игольчатые вентили, Р - редуктор давления воздушный типа РДВ-1М, М1-манометр типа ОБМ-1006 (предел измерения 0...10 кГс/см<sup>2</sup>), М2-манометр сильфонный самопишущий типа МСС-712, предел измерения 0...1 кс/см<sup>2</sup>, класс точности 1, М3 - манометр трубчатый самопишущий типа МТС-712, предел измерения 0...1 кГс/см<sup>2</sup>, класс точности 1, М4 - манометр трубчатый рабочий, пределы измерения 0...1,6 кГс/см<sup>2</sup>, класс точности 1,5, М5 - манометр трубчатый образцовый типа ОБМ-160, пределы измерения 0...1,6 кГс/см<sup>2</sup>, класс точности 0,25.

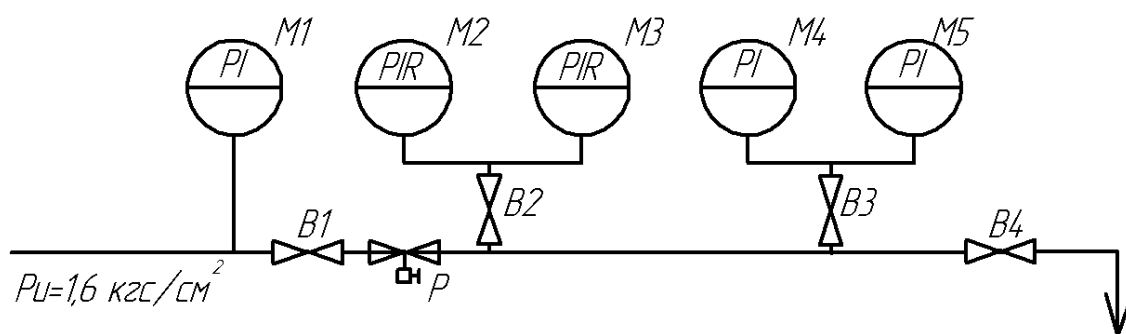


Рис.2

Воздух поступает из ресивера и проходит последовательно через вентиль В1, редуктор Р, вентиль В3 к рабочему поверяемому М4 и образцовому М5 манометрам, а также к манометрам самопишущим М2 и М3 через вентиль В2. Манометр М1 показывает наличие давления в сети установки.

### Требования техники безопасности

Поверяемые приборы М4 и М5 рассчитаны на измерение давления до 1,6 кгс/см<sup>2</sup>, а приборы измеряют давление до 1 кгс/см<sup>2</sup>.

Во избежании порчи приборов не допускается подавать на поверяемые приборы М4 и М5 давление более 1,6 кгс/см<sup>2</sup>, а при проверке приборов М2 и М3 подаётся давление не более 1 кгс/см<sup>2</sup>.

При проверке приборов М4 и М5 вентиль В2 должен быть закрыт.

### Порядок проведения измерений

1. Вентиль В1 закрыт. Проверить и закрыть вентили В2 и В3. Ручка редуктора Р должна быть выведена на минимальное давление вращением влево до упора.
2. Открыть вентиль В3.
3. Редуктор Р установить давление, соответствующее первому делению шкалы манометра М4. Записать показания приборов М4 и М5.
4. Установить давление по показанию манометра М4, соответствующее 0,1 кгс/см<sup>2</sup>. Записать показания приборов М4 и М5 в таблицу 2.

Таблица 2.

| Номер | Прямой ход. |     |            | Обратный ход. |     |            | $\gamma = \Delta / X_N \cdot 100\%$ |
|-------|-------------|-----|------------|---------------|-----|------------|-------------------------------------|
|       | Xхп         | Xхд | $\Delta x$ | Xхп           | Xхд | $\Delta x$ | $\Delta = \Delta x_{\max}$          |
|       |             |     |            |               |     |            |                                     |

В дальнейшем проверить ряд точек шкалы манометра М4 с интервалом 0,1 кгс/см<sup>2</sup> при постепенном увеличении давления до 1,6 кгс/см<sup>2</sup> и последовательном уменьшении до нуля (прямой и обратный ход).

5. Аналогичным образом проверить приборы М2 и М3. Показания снимаются для оцифрованных точек шкал манометров. При поверке всех манометров используется один образцовый прибор М5.

6. Исследовать вариацию показаний прибора М4, используя следующий порядок. Плавнo повышая давление с интервалом  $0,2 \text{ кгс/см}^2$ , произвести отсчеты показаний приборов М4 и М5, причем установку давления редуктором произвести по показаниям манометра М5. Заполнить таблицу 3 для прямого и обратного хода.

Таблица 3.

| Номер | Прямой ход |       | Обратный ход |       | Вариация           |
|-------|------------|-------|--------------|-------|--------------------|
|       | $x_n$      | $x_d$ | $x_n$        | $x_d$ | $B_A = x_n - x_n'$ |
|       |            |       |              |       |                    |

7. Закончить работу и привести установку в исходное состояние: закрыть вентиль В4, выпустить воздух из магистрали в атмосферу, закрыть вентили В2, В3, В4, проверить показания приборов М2, М3, М4, М5 - стрелки приборов должны быть на нуле.

### Обработка результатов наблюдений

Результаты наблюдений сводятся в таблицы 2 и 3. Абсолютную и относительную погрешности вычислить по формулам (3) и (4). Оценка не исключенной систематической погрешности образцового манометра оценивается по формуле (7).

### Содержание и оформление отчета по работе

Отчет должен включать: название лабораторной работы, развернутую формулировку цели работы, схему лабораторной установки, результаты исследований в виде таблиц 2 и 3, краткие выводы о проявлении вариации показаний приборов.

### Вопросы для самопроверки

1. Что такое давление?
2. Что такое абсолютное, барометрическое, избыточное давление и вакуум?
3. Какие существуют единицы при измерении давления?
4. Какие приборы применяются для измерения давления, перепада давления, вакуума?
5. Что называется абсолютной и относительной погрешностями измерения?
6. Что такое вариация показаний прибора?
7. Что такое класс точности прибора?

**Время, отведенное на лабораторную работу.**

|                                                            |               |
|------------------------------------------------------------|---------------|
| Подготовка к работе                                        | 1,0 акад. час |
| Выполнение работы                                          | 1,0 акад. час |
| Обработка результатов эксперимента<br>и оформление отчетов | 1,0 акад. час |
| Отчет по лабораторной работе                               | 1,0 акад. час |

## Лабораторная работа 3

### ПОВЕРКА ГРАДУИРОВКИ ЛОГОМЕТРА

**Цель работы:** Ознакомиться с принципом действия и устройством логометра, техникой проверки градуировки шкалы логометра, предназначенного для измерения температуры.

#### Основные понятия

##### 1. Принцип действия логометра и измерение температуры с помощью него

Одним из наиболее распространенных вторичных приборов, работающих в комплекте с термометром сопротивления, является магнитоэлектрический логометр, относящийся к группе технических приборов.

Принципиальная схема логометра приведена на рис.1. Между полюсными наконечниками постоянного магнита перемещаются одинаковые скрещенные рамки  $R_1$  и  $R_2$  из тонкого медного провода, жестко скрепленные между собой и со стрелкой прибора. Ток проводится к рамкам через спиральные пружинки с очень малым противодействующим моментом. Эти пружинки обеспечивают возврат стрелки в исходное положение при отключении источника питания.

Воздушный зазор между полюсными наконечниками и сердечниками неравномерный, поэтому магнитная индукция меняется. Наибольшее значение магнитной индукции в середине полюсных наконечников, наименьшее - у края.

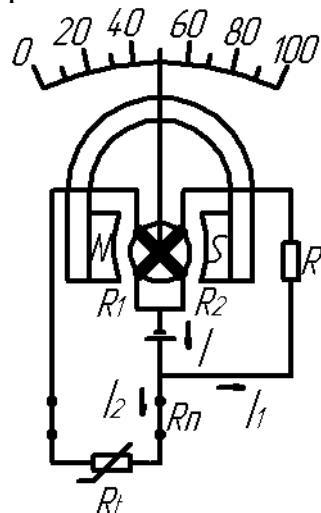


Рис.1

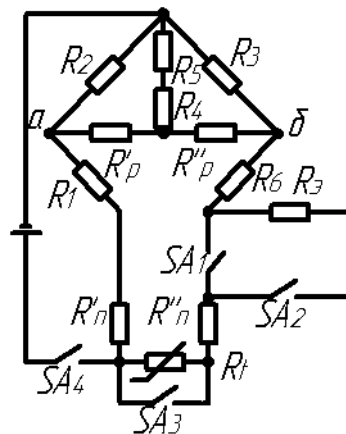


Рис.2

Измерительная схема логометра состоит из параллельных цепей, получающих питание от одного источника. В одну из цепей включено термосопротивление  $R_t$  с сопротивлением  $R_n$  соединительных проводов и рамка  $R_2$ . Во вторую цепь включены рамка  $R_1$  и постоянное сопротивление  $R$ .

Через рамки  $R_1$  и  $R_2$  протекают токи  $I_1$  и  $I_2$ , образующие свои магнитные поля, которые, взаимодействуя с полем постоянного магнита, создают вращающие моменты  $M_1$  и  $M_2$ , направленные навстречу друг другу.

Подвижная система находится в равновесии, если моменты рамок, обусловленные токами  $I_1$  и  $I_2$  равны. Если сопротивления обеих цепей одинаковы, т.е.  $R_2 + R_t + R_n = R_1 + R$ , то  $I_1 = I_2$  и подвижная система займет положение, симметричное относительно полюсных наконечников. Увеличение  $R_t$  при увеличении температуры вызовет уменьшение  $I_2$  и вращающего момента  $M_2$ . В результате равновесие нарушается, и подвижная система поворачивается по часовой стрелке, рамка  $R_2$  переходит в зону большей, а рамка  $R_1$  - в зону меньшей магнитной индукции. Новое равновесие подвижной системы наступит в положении, при котором вращающие моменты рамок сравняются. Угол  $\varphi$  поворота подвижной системы логометра зависит от соотношения сопротивлений цепей рамок

$$\varphi = f\left(\frac{R_2 + R_t + R_n}{R_1 + R}\right) \quad (1)$$

При постоянных сопротивлениях  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_n$ ,  $R$  угол поворота стрелки логометра зависит только от величины сопротивления  $R_t$ . Для измерения температуры шкала логометра, работающего совместно с термосопротивлением, градуируется в единицах температуры.

## 2. Принципиальная электрическая схема логометра Л - 64

Принципиальная электрическая схема логометра Л - 64 показана на рис.2. Рамки логометра  $R'_p$  и  $R''_p$  включены последовательно в диагональ моста, составленного из постоянных резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_6$ , изготовленных из манганиновой проволоки, отличающейся малым температурным коэффициентом электрического сопротивления, а также термометра сопротивления  $R_t$  и сопротивления  $R'_n$  и  $R''_n$  соединительных проводов, которые включают в себя уравнивательные катушки, намотанные манганиновым проводом.

Резистор  $R_4$  служит для изменения угла отклонения подвижной системы, а сопротивление  $R_5$  изготовлено из медной проволоки и служит для температурной компенсации. Резистор  $R_1$  выбран так, чтобы мост находился в равновесии при сопротивлении термометра  $R_t$ , соответствующему значению температуры в середине шкалы прибора. При этом, вследствие равенства потенциалов на вершинах моста  $a$  и  $b$  падение напряжения на резисторах  $R_2$  и  $R_3$ , и силы тока  $I_1$  и  $I_2$  в рамках  $R'_p$  и  $R''_p$  равны и обе рамки располагаются в магнитном поле симметрично относительно оси полюсных наконечников. В случае изменения  $R_t$  нарушается баланс токов  $I_1$  и  $I_2$ , и рамки приходят в движение и перемещаются до наступления нового состояния равновесия.

Подгонку сопротивления соединительных проводов до расчетного значения выполняют отдельно для каждого провода. Расчетное

сопротивление для провода указано на циферблате прибора (5 или 15 Ом, т.е. 2,5 или 7,5 Ом для каждого провода).

При проверке правильности подгонки  $R'_n$  и  $R''_n$  вместо  $R_t$  включается эквивалентное сопротивление  $R_z$ . В этом случае при включении питания стрелка логометра должна устанавливаться на контрольной отметке, нанесенной в середине шкалы логометра (красная отметка).

## **Методика эксперимента**

### *1. Метод поверки логометра*

Первичным прибором по отношению к логометру является термосопротивление, выходным сигналом которого является изменение сопротивления.

Проверка показаний логометра сводится к сопоставлению его показаний с табличными при подключении к входу прибора имеющегося сопротивления. Изменение сопротивления имитируется магазином сопротивления в соответствии с градуировочной таблицей.

### *2. Устройство установки для проверки логометра*

Установка для проверки градуировки логометра включает: щит, на котором укреплен логометр типа Л-64 с пределами измерения  $0 \dots 100^\circ\text{C}$ , ценой деления  $2^\circ\text{C}$ , классом точности 1,5, источник питания (входное напряжение 220 В переменного тока, выходное - стабилизированное напряжение 5 В постоянного тока), переключатели  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ , магазин сопротивления МОД - 49 класс точности 0,05.

С помощью магазина сопротивлений производится точная имитация работы термосопротивления, имеющего стандартную градуировку № 23.

### *3. Оценка точности измерений*

Точность проверки логометра зависит от точности воспроизведения стандартной градуировки термосопротивления, т.е. погрешности подачи сопротивления на вход логометра, а также точности снятия показаний оператором (погрешность параллакса).

Наибольшая погрешность возникает при воспроизведении меньших сопротивлений (в данном случае 53 Ом). Класс точности магазина сопротивлений 0,05. Погрешность воспроизведения характеристики термосопротивления в точке  $0^\circ\text{C}$  ( $R=53\text{ Ом}$ ) равна:

$$\Delta_B = \pm \frac{S \cdot R}{100\%} = \pm \frac{0,05\% \cdot 53\text{ Ом}}{100\%} = \pm 0,0265\text{ Ом}$$

Согласно градуировочной характеристики изменению температуры на 2 °С соответствует изменение сопротивления на 0,452 Ом. Погрешность, выраженная в градусах равна:

$$\Delta_B = \pm \frac{2^0 \text{C} \cdot 0,0265 \text{Ом}}{0,452 \text{Ом}} = \pm 0,12^0 \text{C}$$

Погрешность от параллакса возникает если, например, в самом распространенном случае оператор располагается против центра прибора, в то время, как стрелка находится на краю шкалы.

Погрешность от параллакса для шкалы, нанесенной на цилиндрической поверхности, равна:

$$\Delta_n = \frac{ha}{2(H - \sqrt{r^2 - a^2} / l)} + htg \arcsin \frac{a}{2r} \quad (2)$$

где: h=2 мм - расстояние от стрелки до циферблата,

a=120 мм - хорда, соответствующая части окружности, на которой нанесена шкала,

H=r+l=400 мм,

r=150 мм - радиус окружности сечения цилиндрической поверхности, на которой нанесена шкала,

l=250 мм - расстояние от глаз наблюдателя до шкалы.

Подставляя числовые значения в формулу (2) получим ошибку оператора для указанного выше случая:

$$\Delta_n = \frac{2 \cdot 120}{2(400 - \sqrt{22500 - 3000})} + 2tg \arcsin \frac{120}{2 \cdot 150} = 1,28(\text{мм})$$

Интервал деления шкалы логометра равен 2,5 мм, и соответствует цене деления 2 °С. Погрешность от параллакса в единицах измеряемой величины равна:

$$\Delta_{n^0 \text{C}} = \frac{1,28 \text{мм} \cdot 2^0 \text{C}}{2,5 \text{мм}} = 1,04^0 \text{C}$$

Если глаз наблюдателя будет находиться против центра шкалы прибора, а стрелка сместится на четверть шкалы, то погрешность измерения от параллакса составит 0,48 °С.

Сравнивая погрешность, вносимую поверочным средством (магазин сопротивлений), и погрешность, вносимую оператором при его неправильном положении в ходе измерений, можно заключить, что субъективная погрешность оказывается в несколько раз больше погрешности поверочного средства.

Для исключения погрешности от параллакса необходимо каждое измерение производить при нормальной линии зрения к шкале прибора. Особенно это важно соблюдать при работе с приборами, шкала которых нанесена на цилиндрической поверхности.

## Требования техники безопасности

1. Соблюдать порядок включения приборов.
2. В случае обнаружения неисправности приборов поставить тумблеры в положение “Включено” и доложить преподавателю.
3. Не производить никаких ремонтных работ.
4. Не прикасаться к частям приборов и клеммам, находящимся за стендом.
5. Убедитесь в том, что имеется заземление стенда.

## Порядок проведения измерений

Произвести проверку градуировки логометра Л-64 с помощью магазина сопротивлений согласно таблице 1 стандартной градуировки №23 для термосопротивления.

Таблица 1

|                                  |    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура, $T^{\circ}\text{C}$ | 0  | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   |
| $R_T$ Ом                         | 53 | 55,26 | 57,52 | 59,77 | 62,03 | 64,29 | 66,55 | 68,81 | 71,05 | 73,32 | 75,58 |
|                                  |    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

Результаты проверки свести в таблицу 2.

Таблица 2.

| T°С | RГ Ом | Прямой<br>Ход R1 | Обратный<br>Ход R2 | Абсолютная погрешность |      |              |      | ΔT | δпT | ВΔ |
|-----|-------|------------------|--------------------|------------------------|------|--------------|------|----|-----|----|
|     |       |                  |                    | Прямой ход             |      | Обратный ход |      |    |     |    |
|     |       |                  |                    | ΔR1                    | ΔR̄1 | ΔR2          | ΔR̄2 |    |     |    |
| 1   | 2     | 3                | 4                  | 5                      | 6    | 7            | 8    | 9  | 10  | 11 |
|     |       |                  |                    |                        |      |              |      |    |     |    |

1. Тумблеры  $SA_2, SA_3, SA_4$  поставить в положение включено,  $SA_1$  - выключено. Стрелка логометра, если прибор исправен, должна установиться в середине шкалы на красной отметке.

2. Тумблеры поставить в положение выключено и установить с помощью магазина сопротивлений входное сопротивление 53 Ом, соответствующее  $0^{\circ}\text{C}$ .

3. Включить тумблеры  $SA_1, SA_4$  и произвести проверку логометра в оцифрованных точках при прямом и обратном ходе, изменяя входное сопротивление согласно таблице 1. В графы 1 и 2 таблицы 2 предварительно перенести градуировочные данные таблицы 1. При прямом ходе изменять входное сопротивление в сторону увеличения и производить отсчет в момент, когда стрелка логометра достигает проверяемого деления. При обратном ходе входное сопротивление необходимо уменьшать, производя аналогичный отсчет. Для прямого и обратного хода повторить измерения три раза, занося результаты в графы 3 и 4 таблицы 2.

4 Закончить измерения и привести установку в исходное состояние: выключить тумблеры, установить рукоятки магазина сопротивлений на ноль.

### Обработка результатов наблюдений

1 Систематическую составляющую  $\Delta T$  основной погрешности логометра в оцифрованных точках шкалы вычислить по формуле:

$$\Delta T = K_{\pi} \frac{\Delta \bar{R}_1 + \Delta \bar{R}_2}{2} \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (3)$$

где  $\Delta \bar{R}_1$  и  $\Delta \bar{R}_2$  - средние значения (по трем измерениям для каждой оцифрованной точки шкалы) абсолютных погрешностей при прямом и обратном ходе,  $K_{\pi} = 4,44^{\circ}\text{C}/\text{Ом}$  - коэффициент передачи прибора.

2. Для каждой оцифрованной точки логометра определить приведенную погрешность  $\delta_{\pi} T$ :

$$\delta_{\pi} T = \frac{\Delta T^{\circ}\text{C}}{100^{\circ}\text{C}} 100\% ,$$

где  $100^{\circ}\text{C}$  - нормирующее значение измеряемой величины.

Класс точности  $K$  прибора равен  $\delta_{\pi \max} T$ , которое выбирают из графы 10 таблицы 2.

3. Вариацию следует определять как абсолютную величину разности между значениями  $\Delta \bar{R}_1$  и  $\Delta \bar{R}_2$

$$\Delta = K_{\pi} |\Delta \bar{R}_1 - \Delta \bar{R}_2| \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (4)$$

### Содержание и оформление отчета по работе

Отчет должен включать: название лабораторной работы, развернутую формулировку цели работы, принципиальную схему логометра и электрическую схему логометра, результаты проверки прибора в виде таблицы 2, выводы о классе точности и о проявлении вариации показаний прибора.

### Вопросы для самопроверки

1. Каков принцип действия прибора?
2. Поясните принципиальную схему логометра?
3. С какой целью постоянные резисторы измерительного моста изготовлены из манганиновой проволоки?
4. В чем заключается проверка правильности подгонки сопротивления соединительных проводов?
5. В чем заключается метод проверки логометра?

6. Какие погрешности влияют на точность проверки логометра?
7. Какая погрешность вносится проверочным средством (магазином сопротивления)?
8. Что такое погрешность от параллакса и как избежать этой погрешности?
9. Какова последовательность операций при проверке логометра?
10. Что такое абсолютная и относительная погрешности прибора?
11. Что такое вариация показаний прибора?

#### **Время, отведенное на лабораторную работу**

|                                                            |                |
|------------------------------------------------------------|----------------|
| Подготовка к работе                                        | 1,0 акад. часа |
| Выполнение работы                                          | 1,0 акад. час  |
| Обработка результатов эксперимента<br>и оформление отчетов | 1,0 акад. часа |
| Отчет по лабораторной работе                               | 1,0 акад. часа |

## Лабораторная работа 4

### ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ

**Цель работы:** Изучить метод градуировки термопары, установку для градуировки и проградуировать рабочую термопару.

#### Основные понятия

##### *1. Механизм образования термоЭДС*

В межмолекулярном пространстве проводников концентрация свободных электронов в единице объема зависит от материала проводника и его температуры.

При соединении двух проводников из разнородных материалов, один из которых содержит большее количество свободных электронов в единице объема, возникает диффузия электронов в проводник с меньшим их количеством. При этом первый проводник станет заряжаться положительно, а второй - отрицательно, что приведет к формированию электрического поля в месте их соединения. Это электрическое поле будет противодействовать диффузии электронов, вследствие чего наступит состояние динамического равновесия, при котором между свободными концами спаянных проводников появится разность потенциалов. С увеличением температуры проводников величина разности потенциалов (термо - ЭДС) также увеличивается. Кроме того, термо-ЭДС возникает и между концами однородного проводника, имеющими разные температуры. В этом случае до наступления состояния динамического равновесия положительно заряжается более нагретый конец проводника, как обладающий большей концентрацией свободных электронов по сравнению с концом, менее нагретым. Возрастание разности температур между концами проводника приводит к увеличению в нем термо-ЭДС.

##### *2 Определение результирующей термо-ЭДС термопары*

В замкнутой электрической цепи, состоящий из двух разнородных проводников (термоэлектродов ) А и В ( рис. 1), образующих термопару, одновременно действуют рассмотренные выше факторы. В спаях 1 и 2 и между концами каждого однородного термоэлектрода возникают термо-ЭДС, которые зависят от температуры спаев  $t$  и  $t_0$  и материалов проводников. Тогда при отходе контура термопары против часовой стрелки имеем термо-ЭДС  $e_{AB}(t)$  и  $e_{BA}(t_0)$ , обусловленные температурой  $t$  и  $t_0$ . Результирующая термо-ЭДС  $E_{AB}(t, t_0)$  равна алгебраической сумме термо-ЭДС  $e_{AB}(t)$  и  $e_{BA}(t_0)$ .

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0),$$

учитывая, что  $e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$ , то получим  
$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0).$$

При равенстве температур обоих спаев результирующая термо-ЭДС равна нулю.

Термометр состоит из термопары и подключенного к ней при помощи соединительных проводов электроизмерительного прибора. Измерение температуры при помощи термопары возможно при известной температуре ее свободного конца. Экспериментальное определение термо-ЭДС  $E_{AB}(t, t_0)$  термопары в зависимости от температуры рабочего конца при постоянном значении температуры свободного конца  $t_0$  называется градуировкой термопары. Термо-ЭДС термопар промышленных типов невелика и составляет не более 8 мВ на  $100^\circ\text{C}$  и при измерении высоких температур не превышает 70 мВ.

### Методика эксперимента

Градуировка термопары производится измерением термо-ЭДС компенсационным методом на температурах, измеряемых образцовой термопарой. Схема установки для градуировки термопары приведена на рис. 2. Она состоит из муфельной печи 1, термопары 2, регулятора температуры 3, контрольной лампы 4 регулятора температуры, контактора 5 цепи питания печи, задатчика 6 температуры регулятора, выключателя 7 системы регулирования температуры, образцовой и градуируемой термопар - 8, 9, переключателя 10, потенциометра 11 типа "ПП" 1-го класса точности. На рис. 2 показаны также: 12, 13 - ручки потенциометра, соответственно "Грубо" и "Точно", 14- переключатель рода работ потенциометра ("И" - измерение, "К" - контроль).

Градуировка термопары должна производиться при постоянной температуре холодных спаев, поэтому холодные спаи обеих термопар удалены компенсационными проводами от муфельной печи и помещены в коробку холодных спаев. Компенсационные провода применяются либо из таких же материалов, что и электроды термопары, либо из эквивалентных, которые в паре развивают такую же ЭДС, как и электроды термопары.

Термо-ЭДС, развиваемая термопарой, измеряется компенсационным методом с помощью потенциометра. Этот метод основан на компенсации термо-ЭДС термопары падением напряжения на известном сопротивлении, и суммарный ток, протекающий через нулевой прибор в момент равенства напряжений и термо-ЭДС равен нулю. Электрическая схема измерения компенсационным методом с помощью потенциометра типа "ПП" показана на рис. 3.

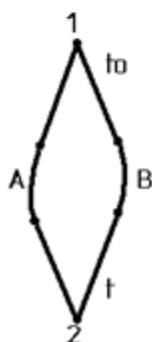


Рис.1

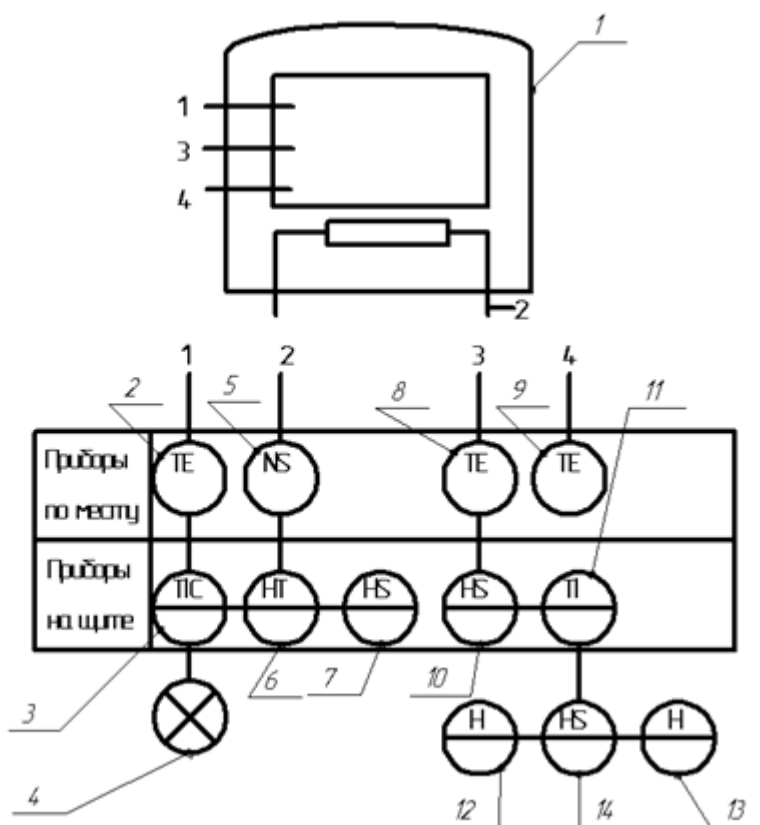


Рис.2

В положении “К” переключателя П нормальный элемент “НЭ” подключается через нулевой прибор “НП” к сопротивлению  $R_{НЭ}$ . Сопротивлением  $R_B$  устанавливают такую силу тока через сопротивление  $R_{НЭ}$ , чтобы падение напряжения на нем было равно ЭДС нормального элемента, при этом ток через нулевой прибор протекать не будет и его стрелка установится в нулевое положение. Этим устанавливается калибровка тока через сопротивление  $R$ , точность которой определяется постоянством ЭДС нормального элемента. ЭДС нормального элемента стабильна и известна с большой точностью ( $E_{НЭ} = 1,01850$ ).

При измерении ЭДС термопары переключатель П ставится в положение “И” и подбирается такое сопротивление  $R$ , падение напряжений на котором уравнивает термо-ЭДС. Так как падение напряжения при постоянном токе зависит только от величины сопротивления, то шкала сопротивлений может быть отградуирована в милливольтках. Поскольку все измерения проводятся при отсутствии тока в НП, то на них не влияет изменение сопротивления цепи, вызванного изменением температуры окружающей среды.

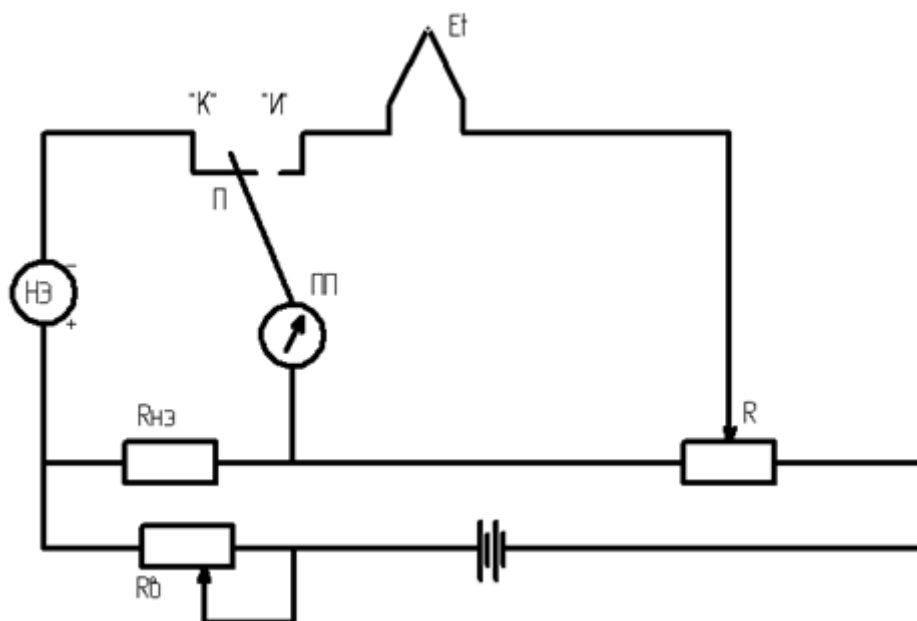


Рис.3

Градуировка производится методом сравнения показаний градуируемой термопары с образцовой, зависимость термо-ЭДС которой от температуры известна. По зависимости термо-ЭДС образцовой термопары строят градуировочную характеристику исследуемой термопары. Для построения градуировочной кривой необходимо определить не менее пяти точек с интервалом между ними  $10...20^{\circ}\text{C}$ .

Температура в печи ориентировочно устанавливается задатчиком регулятора температуры по шкале регулятора. Если печь была холодная, то вначале она нагревается до установленной температуры, при этом горит красная лампочка на лицевой панели регулятора. Как только печь нагреется до установленной температуры, регулятор выключит электропитание печи. Лампочка гаснет. В дальнейшем регулятор будет включать и выключать печь, поддерживая заданную температуру в ней с точностью  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Измерение термо-ЭДС образцовой и градуируемой термопар необходимо производить сразу после выключения красной лампочки регулятора с минимально возможным интервалом между измерениями. Для каждой точки делается пять замеров, которые используются при статистическом анализе результатов измерений.

### Требования техники безопасности

1. Соблюдать порядок включения приборов.
2. В случае обнаружения неисправности приборов поставить тумблеры в положение "Выключено" и доложить преподавателю.
3. Не производить ремонтных работ.
4. Не касаться частей приборов и клемм, находящихся за стендом.
5. Убедитесь в том, что имеется заземление стенда.

## Порядок проведения измерений

1. Установить задатчиком температуры 6 (рис.2) регулятора 3 минимальную температуру регулирования  $50^{\circ}\text{C}$  в муфельной печи 1.

2. Включить переключатель 7. Регулятор сработает и загорится красная лампочка, сигнализирующая о подключении нагревательного элемента печи к питанию.

3. После отключения красной лампочки регулятора температуры 3, сигнализирующей о том, что заданная температура в печи достигнута, установить переключатель рода работ потенциометра 11 в положение “И”, а переключатель 10 в положение “Тобр.” для измерения термо-ЭДС образцовой термопары.

4. Произвести измерение термо-ЭДС образцовой термопары изменением положения ручек потенциометра “Грубо” 12 и “Точно” 13. Снять показания со шкал ручек 12 и 13, причем, со шкалы ручки 12 “Грубо” снимают мВ, а со шкалы ручки 13 “Точно” - десятые доли мВ. После снятия показаний установить переключатель рода работ 10 в нейтральное положение.

5. Установить переключатель 10 в положение “Траб.” для измерения термо-ЭДС градуируемой термопары и повторить измерение по пункту 4.

6. Повторить измерения по пунктам 3-5 не менее пяти раз и записать показания в таблицу

Таблица

| № точки | № замеров | Образцовая термопара  |         | Температура в печи ( $^{\circ}\text{C}$ ) t | Градуируемая термопара |         |
|---------|-----------|-----------------------|---------|---------------------------------------------|------------------------|---------|
|         |           | E(t, t <sub>0</sub> ) | E(t, 0) |                                             | E(t, t <sub>0</sub> )  | E(t, 0) |
|         |           |                       |         |                                             |                        |         |

7. Повторить пункты 3.- 6 для других точек с интервалом  $10...20^{\circ}\text{C}$ .

8. Выключить выключатель 7. Вывести задатчик температуры регулятора 3 в минимальное положение на шкале.

## Обработка результатов наблюдений

### 1. Учет поправки на температуру холодных спаев

Для определения истинной температуры в печи необходимо учитывать поправку на температуру холодных спаев  $t_0$ , не равную  $0^{\circ}\text{C}$ . В данном эксперименте  $t_0$  - это температура в помещении.

Поправка учитывается по формуле:

$$E(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0),$$

где  $E(t, 0)$  - термо-ЭДС, развиваемая термопарой при температуре горячего спая  $t$ , а холодного -  $0^{\circ}\text{C}$ ;

$E(t, t_0)$  - измеряемая потенциометром термо-ЭДС;

$E(t_0, 0)$  - поправка - термо-ЭДС, развиваемая термопарой при температуре горячего спая  $t_0$ , а холодного -  $0^{\circ}\text{C}$ .

Так как рабочая и образцовая термопары изготовлены из одинаковых материалов, то величина  $E(t_0, 0)$  в зависимости от температуры в помещении ( $t_0$ ) в обоих случаях берется из градуировочной таблицы для образцовой термопары. Температура в печи определяется по градуировочной таблице образцовой термопары по найденным значениям  $E(t, 0)$  образцовой термопары. По результатам наблюдений строится характеристика  $E(t, 0) = f(t)$  для рабочей термопары.

### 2. Статистический анализ и оценка погрешностей измерения

Из-за неизбежных погрешностей измерения результаты наблюдений одной и той же величины отличаются между собой. Точность измерений при наличии рассеяния величин оценивают с помощью вероятностных (статистических) характеристик. Статистический анализ результатов измерения с целью определения математических ожиданий и доверительных погрешностей результатов измерений произвести согласно методике изложенной в руководстве к лабораторной работе № 1. При определении доверительной погрешности задаться доверительной вероятностью (надежностью)  $\beta = 0,95$ .

### Содержание и оформление отчета о работе

Отчет должен включать:

1. Название лабораторной работы,
2. Формулировку цели работы,
3. Схему лабораторной установки (рис. 2),
4. Результаты исследований в виде таблицы,
5. Статистическую обработку результатов наблюдений,
6. Градуировочный график,
7. Оценку погрешностей измерений.

### Вопросы для самопроверки

1. Как возникает термо-ЭДС?
2. Какова чувствительность термопары?
3. Что такое градуировка термопары?
4. В чем сущность компенсационного метода измерений?
5. Как определить истинную температуру в печи?
6. Как учитывать изменение температуры холодных спаев?
7. Какова методика градуировки термопары?
8. Из каких материалов изготавливают термопары?
9. Чем отличаются характеристики термопар марок ТХК, ТХА и ТПП?

### Время, отведенное на лабораторную работу

|                                                         |                |
|---------------------------------------------------------|----------------|
| Подготовка к работе                                     | 0,5 акад. часа |
| Выполнение работы                                       | 1,0 акад. час  |
| Обработка результатов эксперимента и оформление отчетов | 0,5 акад. часа |
| Отчет по лабораторной работе                            | 0,5 акад. часа |

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

**Цель работы:** изучить принцип работы, конструкцию и исследовать характеристики индуктивного преобразователя.

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

#### *Назначение и основные типы индуктивных преобразователей*

Индуктивный преобразователь в приборах технологического контроля параметров химических процессов применяется для преобразования сигнала в виде перемещения подвижной части чувствительного элемента датчика в электрический сигнал. На рис. 1 показана принципиальная схема датчика давления, в котором под действием давления  $P$  прогибается мембрана 1, что вызывает изменение воздушного зазора между подвижным 2, и неподвижным 3 сердечниками преобразователя.

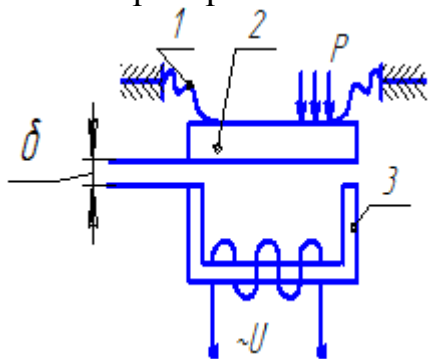


Рис. 1

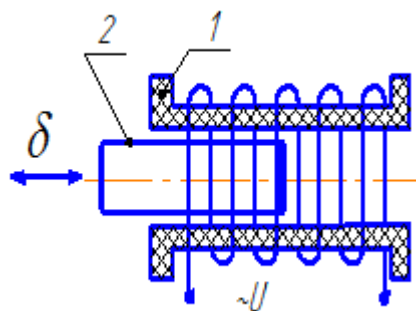


Рис. 2

Рабочее перемещение в преобразователе подобного типа выбирается в пределах 0,01...1 мм.

На рис. 2 показана схема преобразователя для перемещений 0,1...100 мм. Он представляет собой катушку 1, внутри которой помещен сердечник 2. В обоих преобразователях перемещение сердечника вызывает изменение индуктивности катушки.

Одним из основных достоинств индуктивных преобразователей является возможность получения большой мощности выходного сигнала, что позволяет пользоваться сравнительно малочувствительным указателем на выходе измерительной цепи. В рабочей части характеристика преобразователя близка к линейной.

#### *Основные соотношения, характеризующие работу индуктивного преобразователя*

Индуктивный преобразователь питается переменным электрическим током. Ток в цепи электрической катушки датчика равен:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (1)$$

где  $Z$  - полное сопротивление катушки преобразователя

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (2)$$

где  $R$  - активное сопротивление катушки,  
 $X_L = \omega L$  - индуктивное сопротивление катушки,  
 $\omega = 2\pi f$  - круговая частота питающего тока,  
 $f$  - частота тока.

Из электротехники известно, что величина индуктивности рабочей обмотки связана с параметрами сердечника магнитопровода соотношением

$$L = \frac{W^2}{R_m} = \frac{W^2}{R_c + R_\delta}, \quad (3)$$

где  $W$  - число витков катушки,  
 $R_m$  - магнитное сопротивление магнитопровода,  
 $R_c = l / \mu_{ac} S$  - магнитное сопротивление стальной части магнитопровода,  
 $R_\delta = 2\delta / \mu_{av} S$  - магнитное сопротивление воздушных зазоров,  
 $l$  - длина стальной части магнитопровода,  
 $\delta$  - воздушный зазор,  
 $S$  - площадь поперечного сечения магнитопровода,  
 $\mu_{ac}$  - абсолютная магнитные проницаемость стали  
 $\mu_{av}$  - абсолютная магнитные проницаемость воздуха.

Так как,  $\mu_{ac} \gg \mu_{av}$  поэтому принимается

$$R_m \cong R_c = \frac{2\delta}{\mu_{av} S}. \quad (4)$$

В индуктивном преобразователе индуктивное сопротивление намного больше активного  $X_L = \omega L \gg R$ , поэтому можно принять

$$Z \cong \omega L, \quad (5)$$

Подставим значения  $L$  и  $R_m$  из уравнений (3) и (4) в (5) и получим

$$Z = \frac{\omega W^2 S \mu_{av}}{2\delta}. \quad (6)$$

При постоянной величине напряжения, питающего преобразователь, модуль тока равен

$$|I| = \left| \frac{U}{Z} \right| = \frac{2U\delta}{\omega W^2 S \mu_{av}} = K\delta, \quad (7)$$

где  $K = \frac{2U}{\omega W^2 S \mu_{av}}$  - коэффициент передачи индуктивного преобразователя (а также чувствительность).

Таким образом, ток в рабочей обмотке индуктивного преобразователя линейно зависит от величины перемещения  $\delta$  подвижного сердечника.

К недостаткам простейших индуктивных преобразователей относятся наличие значительного тока холостого хода, а также низкая чувствительность при малых перемещениях.

Отмеченные недостатки отсутствуют у индуктивных преобразователей, имеющих две обмотки включаемые по дифференциальной схеме (рис. 3). Преобразователь, исследуемый в данной лабораторной работе, выполнен по этой схеме.

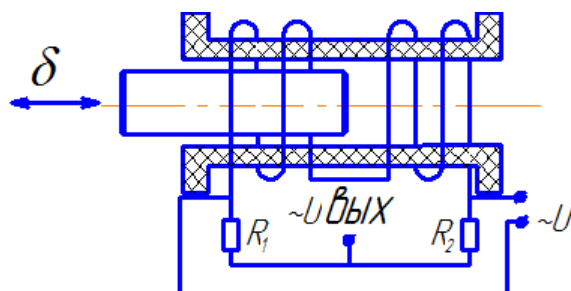


Рис. 3

На одну диагональ моста подается напряжение питания  $U$ , а с другой снимается выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ . В исходном положении, когда сердечник расположен симметрично относительно катушек, мост сбалансирован и выходное напряжение равно нулю. Перемещение сердечника выбивает разбаланс моста, что приводит к возникновению напряжения на выходе.

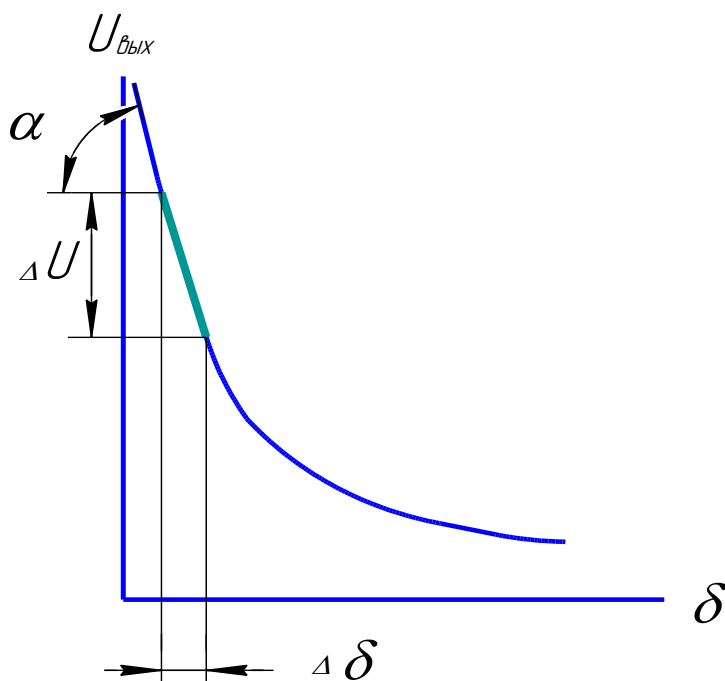


Рис. 4

На рис. 4 показана статическая характеристика преобразователя при движении сердечника в одну сторону от среднего положения. Линейная часть характеристики с наибольшей чувствительностью используется для рабочего движения.

## **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Статическая характеристика индуктивного преобразователя исследуется путем задания точного перемещения сердечнику и измерения напряжения выходного сигнала в момент остановки сердечника.

Перемещение сердечника преобразователя производится с помощью винтовой передачи и контролируется индикатором часового типа ИЧ-10 с диапазоном измерения 0...10 мм, ценой деления 0,01 мм и погрешностью показаний  $\pm 2,5$  мкм на всем участке шкалы индикатора.

Выходной сигнал выпрямляется и измеряется прибором магнитоэлектрического типа марки М24, имеющего верхний предел измерения 3 В, цену деления 0,05 В, класс точности 1,5.

### **ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ**

1. Проверить наличие заземления прибора.
2. Соблюдать порядок включения прибора.
3. Не производить никаких ремонтных работ.
4. В случае обнаружения неисправности прибора выключить его и доложить преподавателю.

### **ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ**

Исследовать статические характеристики индуктивного преобразователя при различных значениях тока нагрузки.

1. Маховиком с правой стороны прибора установить винт перемещения сердечника преобразователя в крайнее правое положение, затем подать винт влево и проследить, чтобы стрелка индикатора встала на отметку 0.

2. Включить прибор.

3. Маховиком М1 установить ток нагрузки 5 мА, а маховиком М2 установить выходной сигнал 2,5 В.

4. Снять статическую характеристику преобразователя при прямом и обратном ходе, не допуская возвратных движений. Для удобства отсчета рекомендуется задавать движение сердечнику, ориентируясь на перемещение стрелки вольтметра на величину двух целых делений (0,2 В). Отсчет по индикатору производить с точностью до 0,01 мм.

5. Произвести измерения при токах нагрузки 5, 10, 15, 20 (мА), соблюдая порядок установки согласно пункту 3.

6. Результаты измерений установки свести в табл. 1.

Таблица 1

| Результаты измерений установки |                                   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |              |
|--------------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|
| I нагрузки                     | U <sub>вых.</sub> (В)             | 2,5 | 2,3 | 2,1 | 1,9 | 1,7 | 1,5 | 1,3 | 1,1 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,1          |
|                                | $\delta'$ мм                      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | прямой ход   |
|                                | $\delta''$ мм                     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | обратный ход |
|                                | $B_{\Delta} = \delta' - \delta''$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | вариация     |

7. Закончить измерения и выключить прибор.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ

1. Построить статические характеристики преобразователя при различных токах нагрузки в координатах  $\delta$  (мм)  $\div U_{вых}$  (В).

2. Определить коэффициент передачи преобразователя на линейном участке характеристики

$$K = \frac{\Delta U}{\Delta \delta} = \operatorname{tg} \alpha.$$

3. Определить вариации выходного сигнала как разность между перемещениями сердечника при одном и том же выходном сигнале

$$B_{\Delta} = \delta' - \delta'' \text{ (мм)}.$$

Для каждого варианта тока нагрузки выбрать наибольшее значение  $B_{\Delta}$  и определить вариацию в единицах выходного сигнала

$$B_{\Delta \max} = B_{\Delta} * K.$$

## СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА О РАБОТЕ

Отчет должен включать: название лабораторной работы, формулировку цели работы, принципиальную схему дифференциального индуктивного преобразования (рис. 3), таблицу с числовыми данными, графическое изображение статических характеристик преобразователя, значение коэффициента передачи K, вариацию выходного сигнала.

### Вопросы для самопроверки

1. Назначение и основные типы индуктивных преобразователей.
2. Каковы достоинства индуктивных преобразователей?
3. От чего зависит индуктивное сопротивление?
4. Какие упрощающие допущения используются при выводе формулы для определения силы тока в электрической цепи индуктивного преобразования?
5. Какова зависимость тока в индуктивном преобразователе от величины зазора?

6. Какие типы индуктивных преобразователей применяются для измерения малых и относительно больших перемещений?

7. Чем отличается индуктивный преобразователь, выполненный по дифференциальной схеме от преобразователя, выполненного с одной катушкой?

8. Для измерения каких параметров технологических процессов применяются датчики с индуктивным преобразователем?

9. Покажите в виде принципиальной схемы конкретный пример построения датчика с индуктивным преобразователем для измерения технологических параметров, например: расхода, давления, плотности и пр.

### **Время, отведенное на лабораторную работу**

|                                                        |               |
|--------------------------------------------------------|---------------|
| Подготовка к работе                                    | 1 академ. час |
| Выполнение работы                                      | 1 академ. час |
| Обработка результатов эксперимента и оформление отчета | 1 академ. час |
| Отчет по лабораторной работе                           | 1 академ. час |

## Список литературы

1. Коновалов Б.И. Теория автоматического управления [Электронный ресурс]: учебное методическое пособие/ Коновалов Б.И., Лебедев Ю.М.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2010.— 162 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13869>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю
2. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Том 1. Линейные системы [Электронный ресурс]: учебник/ Ким Д.П.— Электрон. текстовые данные.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.— 312 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12967>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю
3. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Том 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы [Электронный ресурс]: учебник/ Ким Д.П.— Электрон. текстовые данные.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.— 440 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/12968>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю
4. Храменков В.Г. Автоматизация производственных процессов [Электронный ресурс]: учебник/ Храменков В.Г.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский политехнический университет, 2011.— 343 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34647>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю
5. Автоматизация и управление в технологических комплексах [Электронный ресурс]/ А.М. Русецкий [и др.].— Электрон. текстовые данные.— Минск: Белорусская наука, 2014.— 376 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/29574>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю
6. Федотов А.В. Основы теории автоматического управления [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Федотов А.В.— Электрон. текстовые данные.— Омск: Омский государственный технический университет, 2012.— 279 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/37832>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю
7. Беспалов А.И., Харитонов Н.И. Задачник по системам управления химико-технологическими процессами: Учебное пособие для вузов.- М.: ИКЦ «Академкнига», 2005.- 307 с..
8. Благовещенская М.М. Информационные технологии систем управления технологическими процессами. Учеб. для Вузов/ М.М. Благовещенская, Л.А. Злобин.- М.: Высш.шк., 2005.-768 с.
9. Калиниченко А.В. Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике [Электронный ресурс]/ Калиниченко А.В., Уваров Н.В., Дойников В.В.— Электрон. текстовые данные.— Вологда: Инфра-Инженерия, 2015.— 575 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/5075>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю

Апостолов Сергей Петрович

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО АСУ ТП**  
Учебно-методическое пособие