

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ**

**Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия**

**имени П.А.Столыпина**

**Кафедра «Материаловедения и технологии машиностроения»**

# **АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Практикум**

**Составил: Абрамов А.Е.**

**Ульяновск, 2015**

**Автоматизация научных исследований:** Конспект лекций /Составил  
Абрамов А.Е. – Ульяновск: ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА, 2015. – 112 с.

Предназначен для направления подготовки 35.04.06 «Агроинженерия» (Магистратура) по магистерским программам "Технические системы в агробизнесе" и "Технический сервис в агробизнесе", квалификация (степень) выпускника - магистр.

Печатается по решению учебно-методической комиссии инженерного факультета Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии имени П.А.Столыпина.

© ФГБОУ ВПО Ульяновская УГСХА, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | Прямые и косвенные измерения .....  | 4  |
| 2 | Терморезисторные измерительные преобразователи.<br>Измерение температуры.....   | 13 |
| 3 | Емкостные измерительные преобразователи.<br>Измерение размера.....              | 21 |
| 4 | Индуктивные измерительные преобразователи.<br>Измерение перемещения.....        | 30 |
| 5 | Термоэлектрические измерительные преобразователи.<br>Измерение температуры..... | 39 |
|   |   | 49 |

## Прямые и косвенные измерения

**Цель:** Приобретение навыков планирования и выполнения прямых и косвенных однократных измерений. Получение опыта по выбору средств измерений, обеспечивающих решение поставленной измерительной задачи. Изучение способов обработки и правильного представления результатов прямых и косвенных однократных измерений.

### 1. Общие сведения, необходимые для выполнения работы

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться со следующими вопросами:

- Основные понятия метрологии.
- Классификация и характеристики измерений.
- Классификация и характеристики средств измерений.
- Способы получения и представления результатов однократных измерений.
- Принцип действия, устройство и характеристики средств измерений, используемых при выполнении настоящей работы.

подавляющее большинство измерений, выполняемых на практике, являются однократными. Прежде чем выполнить однократное измерение, необходимо выбрать средство измерения. При выборе средства измерения, исходя из представления об условиях проведения измерения, о свойствах измеряемой величины и ее примерном значении, а также о необходимой точности измерения, определяют с помощью какого измерительного прибора, какого типа, какого класса точности, на каком пределе шкалы будет лучше проводить измерение. Если об ожидаемом значении измеряемой величины можно судить только с большой неопределенностью, средство измерения выбирают предварительно, устанавливают для него

наиболее подходящий предел шкалы и проводят пробные измерения, после чего средство измерения и предел шкалы выбирают окончательно и выполняют измерение для получения результата.

За результат однократного измерения принимают показания средства измерения. Результирующая погрешность однократного измерения в общем случае зависит от целого ряда факторов, в частности, от инструментальной и методической составляющих погрешности, от влияния внешних воздействий и т. д. На практике однократные измерения всегда стремятся организовать так, чтобы результирующая погрешность определялась главным образом

инструментальной составляющей погрешности. В таком случае погрешность измерений оценивают, исходя из класса точности выбранного средства измерений (см. приложение 4).

При расчете погрешности на основе данных о классе точности средства измерений зачастую получают значения, содержащие большое число десятичных знаков. Отметим, что исходными данными для расчета всегда являются нормируемые значения погрешности средства измерений, которые указываются с одной или двумя значащими цифрами. Отсюда следует, что в окончательном значении рассчитанной погрешности должны быть оставлены только первые одна-две значащие цифры. Действительно, если полученное значение погрешности начинается с цифр 1 или 2, то, отбросив второй знак, можно получить большую ошибку (до 30-50%), если же значение погрешности начинается, например, с цифры 9, то указание погрешности, например, 0,94 вместо 0,9 является дезинформацией, так как исходные данные не обеспечивают такой точности.

Поэтому при выполнении расчетов следует руководствоваться следующей рекомендацией [9]: если полученное при расчете значение погрешности начинается с цифры, равной или большей, чем  $V_{10} = 3$ , то в нем сохраняется лишь один знак; если же полученное значение начинается с цифр, меньших 3, то есть с цифр 1 или 2, то в нем сохраняют два знака. В соответствии с этим правилом устанавливаются и нормируемые значения погрешностей средств измерений: в числах 1,5 и 2,5 % указывают два знака, но в числах 0,5; 4; 6 % указывается только один знак.

С учетом изложенного можно сформулировать следующие три правила округления рассчитанного значения погрешности и полученного экспериментального результата измерения.

1. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и одной - если первая цифра есть 3 и более.
2. Результат измерения округляется до того же десятичного разряда, которым заканчивается округленное значение абсолютной погрешности.
3. Округление производится лишь в окончательном ответе, а все промежуточные вычисления проводят с одной-двумя лишними значащими цифрами.

Пример: Вольтметр класса 2,5 с пределом шкалы 300 В показал напряжение  $U_x = 267,5$  В. Оценить погрешность однократного измерения.

Абсолютная погрешность измерения равна  $A(U_x) = y_0 \cdot X_k / 100 = 0,025 \cdot 300 / 100 = 7,5$  В = 8 В. Относительная погрешность измерения равна  $y(x) =$

$$(\Delta_0/x) \cdot 100\% = 7,5/267,5 \cdot 100\% = 2,81\% \approx 2,8\%.$$

Таким образом, в окончательном ответе следует указать: «Абсолютная погрешность измерения составляет 8 В, относительная погрешность измерения составляет 2,8%, измеренное напряжение  $U_x = 268 \pm 8$  В». Более наглядно результат измерений можно представить в виде  $260 \text{ В} < U_x < 276 \text{ В}$ .

При проведении однократных измерений всегда стремятся поддерживать нормальные условия и выбрать такой способ измерений, чтобы методическая погрешность и субъективные погрешности оказывали минимальное воздействие на результат. Если, тем не менее, условия измерений отличаются от нормальных, в результаты измерений вносят поправки, учитывающие погрешности, обусловленные воздействием влияющих величин. При выполнении данной работы следует предполагать, что условия измерений нормальные, а методические и субъективные погрешности пренебрежимо малы.

При проведении косвенных измерений погрешность определяется по результатам прямых измерений. В общем случае решение этой задачи оказывается весьма сложным. Однако есть несколько случаев, когда оценить пределы погрешности результата косвенного измерения просто:

1. Измеряется величина  $Z$ , связанная зависимостью  $Z = X \pm Y$ . Величины  $X$  и  $Y$  измерены с абсолютными погрешностями  $\Delta X$  и  $\Delta Y$ , соответственно. В этом случае для оценки предела абсолютной погрешности результата составляющие погрешности суммируются без учета знака, а именно:  $\Delta Z = \Delta X + \Delta Y$ .
2. Измеряется величина  $Z$ , связанная зависимостями  $Z = X \cdot Y$  или  $Z = X/Y$ . Величины  $X$  и  $Y$  измерены с абсолютными погрешностями  $\Delta X$  и  $\Delta Y$ , соответственно. В этом случае для оценки предела относительной погрешности результата составляющие относительные погрешности суммируются без учета знака, а именно:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y}.$$

3. Измеряется величина  $Z$ , связанная зависимостью  $Z = F(X, Y)$ . Величины  $X$  и  $Y$  измерены с абсолютными погрешностями  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  соответственно. В этом случае для оценки предела абсолютной погрешности результата можно использовать выражение:

$$\Delta Z = \left| \frac{\partial F}{\partial X} \right| \Delta X + \left| \frac{\partial F}{\partial Y} \right| \Delta Y.$$

4.

Легко видеть, что предыдущие формулы для погрешностей следуют из

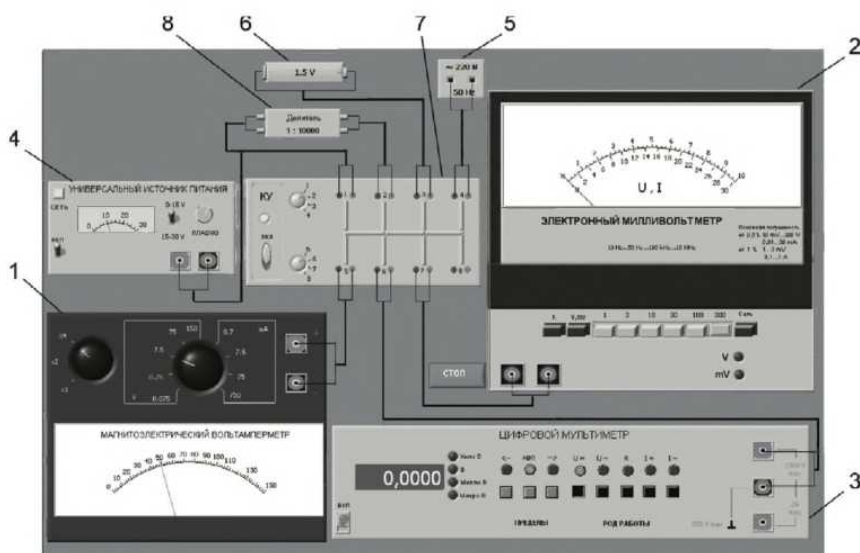
последнего, более общего соотношения.

Использование этих правил позволяет получить удовлетворительную оценку предельной погрешности результата косвенного измерения в случае, когда число аргументов в функциональной зависимости не превышает четырех-пяти.

Отметим, что приведенные в пп. 1-3 способы оценки предельной погрешности косвенных измерений могут дать завышенную оценку значения результирующей погрешности. Однако с точки зрения достоверности результата измерения и с учетом простоты описанного способа такой подход оказывается, как правило, вполне приемлемым.

## 2. Устройство лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой ZetVIEW компьютерную модель, располагающуюся на рабочем столе персонального компьютера. На стенде (рис. 1.) находятся модели магнитоэлектрического вольтамперметра, электронного аналогового милливольтметра среднеквадратического значения, электронного цифрового мультиметра, источников постоянного и переменного напряжения, делителя напряжения и коммутационного устройства.



**Рисунок 1.- Вид модели лабораторного стенда на рабочем столе компьютера при выполнении лабораторной работы 1:**

1- магнитоэлектрический вольтамперметр, 2 - электронный аналоговый милливольтметр, 3 - электронный цифровой мультиметр, 4 - универсальный источник питания, 5 - источник переменного напряжения, 6 - гальванический элемент, 7 - коммутационное устройство, 8 - делитель напряжения

При выполнении работы модели средств измерений и вспомогательных устройств служат для решения описанных ниже задач.

Модель магнитоэлектрического вольтметра (см. приложение 1) используется при моделировании процесса прямых измерений постоянного напряжения и силы постоянного тока методом непосредственной оценки.

Модель электронного аналогового милливольтметра (см. приложение 1) используется при моделировании процесса прямых измерений среднеквадратического значения напряжения в цепях переменного тока синусоидальной и искаженной формы методом непосредственной оценки.

Модель цифрового мультиметра (см. приложение 1) при выполнении работы служит в качестве цифрового вольтметра при моделировании процесса прямых измерений постоянного напряжения и среднеквадратического значения переменного напряжения синусоидальной формы методом непосредственной оценки.

Модель универсального источника питания (УИП) используется при моделировании работы регулируемого источника стабилизированного постоянного напряжения.

Модель источника питания переменного тока используется при моделировании работы имеющего пренебрежимо малое внутреннее сопротивление источника переменного гармонического напряжения частотой 50 Гц с действующим значением, равным примерно 220 В.

Модель гальванического элемента используется при моделировании работы имеющего пренебрежимо малое внутреннее сопротивление источника постоянной электродвижущей силы с ЭДС, равной примерно 1,5 В.

Модель делителя напряжения используется при моделировании работы делителя с коэффициентом деления  $K = 1 : 10\ 000$  при классе точности, равном 0,05, входном сопротивлении не менее 1 МОм, выходном - не более 1 кОм. Делитель можно использовать на постоянном и переменном токе напряжением не более 500 В и частотой до 20 кГц.

Модель коммутационного устройства (КУ) используется при моделировании подключения входа вольтметров к выходу источников измеряемого напряжения. Подключение моделей вольтметров к моделям источников измеряемого напряжения производится с помощью КУ путем установки верхнего переключателя на номер входа, к которому подключается измеряемый источник, а нижнего переключателя КУ - на номер выхода, к которому подключен измерительный прибор. Установленное соединение индицируется на передней панели КУ желтым цветом.



На лицевой панели модели КУ расположены:

- тумблер «ВКЛ» включения КУ;
- переключатели для выбора способа коммутации входов и выходов КУ между собой.

### **3.Задание к работе**

– Запустите программу лабораторного практикума. На рабочем столе компьютера появятся модель лабораторного стенда с моделями средств измерений и вспомогательных устройств (рис. 1) и окно созданного в среде MS Excel лабораторного журнала, который служит для формирования отчета по результатам выполнения лабораторной работы.

– Ознакомьтесь с расположением моделей отдельных средств измерений и других устройств на рабочем столе. Включите модели средств измерений и вспомогательных устройств и опробуйте их органы управления (см. приложение 1). Плавно изменяя напряжение на выходе УИП и поочередно с помощью КУ, подключая к выходу вольтметры, проследите за изменениями их показаний. Поменяйте пределы измерений и снова проследите за изменениями показаний вольтметров при изменении напряжения на выходе УИП. После того как вы убедитесь в работоспособности приборов, выключите все модели и вспомогательные устройства.

– Приступите к выполнению заданий лабораторной работы.

#### ***Задание 1. Выполнение прямых однократных измерений***

Выберите среди имеющихся на рабочем столе средств измерений вольтметр для измерения постоянного напряжения на выходе УИП с относительной погрешностью, не превышающей 1%. При выборе исходите из того, что напряжение на выходе УИП может быть установлено произвольно в диапазоне от 15 В до 30 В:

- 1) выбрав вольтметр, включите его, установите подходящий диапазон измерений и с помощью КУ подключите вольтметр к выходу УИП;
  - 2) включите УИП и установите на его выходе напряжение в указанном диапазоне;
  - 3) снимите показания вольтметра;
  - 4) запишите в отчет: показания вольтметра, тип и класс точности вольтметра, выбранный диапазон измерений.
- в. Выберите среди имеющихся на рабочем столе средств измерений

вольтметр для измерения ЭДС гальванического элемента (значение ЭДС постоянно и лежит в диапазоне от 1,3 В до 1,7 В) с абсолютной погрешностью, не превышающей 2 мВ:

- 1) выбрав вольтметр, включите его, установите подходящий диапазон измерений и с помощью КУ подключите вольтметр к выходу источника ЭДС;
- 2) снимите показания вольтметра;
- 3) запишите в отчет: показания вольтметра, тип и класс точности вольтметра, выбранный диапазон измерений.

с. Выберите среди имеющихся на рабочем столе средств измерений вольтметр для измерения с относительной погрешностью, не превышающей 0,5%, значения напряжения на выходе источника переменного напряжения:

- 1) выбрав вольтметр, включите его, установите подходящий диапазон измерений и с помощью КУ подключите вольтметр к выходу источника переменного напряжения;
- 2) снимите показания вольтметра;
- 3) запишите в отчет: показания вольтметра, тип и класс точности вольтметра, выбранный диапазон измерений.

### ***Задание 2. Выполнение косвенных измерений***

Выберите среди имеющихся на рабочем столе средств измерений вольтметр для косвенного измерения коэффициента деления делителя напряжения:

1. выбрав вольтметр, включите его и установите подходящий диапазон измерений;
2. подключите с помощью КУ делитель к выходу источника напряжения;
3. подключите с помощью КУ вольтметр поочередно к входу и выходу делителя и снимите в обоих случаях показания вольтметра;
4. запишите в отчет: показания вольтметра, тип и класс точности вольтметра, выбранные диапазоны измерений, сведения о делителе напряжения.
5. Сохраните результаты.
6. После сохранения результатов закройте приложение ZetVIEW и, при необходимости, выключите компьютер.
7. Отчет должен быть оформлен в соответствии с требованиями, приведенными во введении. Рекомендованные формы таблиц для записи результатов приведены ниже.

## 4. Оформление отчета

Таблица 1. Прямые измерения напряжения на выходе УИП

|                        |                       |                           |                              |                        |
|------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|
| Вольтметр: тип         |                       | класс точности            |                              |                        |
| Показания измерений, В | Диапазон измерений, В | Абсолютная погрешность, % | Относительная погрешность, В | Результат измерения, В |

Таблица 2. Прямые измерения ЭДС гальванического элемента

|                        |                       |                           |                              |                        |
|------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|
| Вольтметр: тип         |                       | класс точности            |                              |                        |
| Показания измерений, В | Диапазон измерений, В | Абсолютная погрешность, % | Относительная погрешность, В | Результат измерения, В |

Таблица 3. Прямые измерения напряжения на выходе источника переменного напряжения

|                        |                       |                           |                              |                        |
|------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|
| Вольтметр: тип         |                       | класс точности            |                              |                        |
| Показания измерений, В | Диапазон измерений, В | Абсолютная погрешность, % | Относительная погрешность, В | Результат измерения, В |

Таблица 1.1.4. Косвенные измерения коэффициента деления делителя

|   |  |  |  |   |
|---|--|--|--|---|
| Вольтметр: тип  |  | класс точности   |  |   |
| Делитель напряжения: тип  |  | класс точности   |  |   |
| Показания вольтметра на входе, В                                    | Показания вольтметра на выходе, В                                    | Установленный диапазон измерений на входе делителя, В        | Установленный диапазон измерений на выходе делителя, В | Результат измерения коэффициента деления, В |
|   |  |  |  |   |
| Относительная погрешность измерения напряжения на входе делителя, % | Относительная погрешность измерения напряжения на выходе делителя, % | Относительная погрешность измерения коэффициента делителя, % | Результат измерения коэффициента деления               |   |
|   |  |  |  |   |

## 5. Контрольные вопросы

- Дайте определение следующих понятий: измерение, результат измерения, абсолютная погрешность измерения, относительная погрешность измерения.
- Как классифицируют измерения?
- В каких случаях проводят однократные измерения?
- Какие измерения называются прямыми? В каких случаях выполняются

прямые измерения?

- Какие измерения называются косвенными? В каких случаях выполняются косвенные измерения?
- Что такое средство измерения?
- Что такое метрологические характеристики средств измерений? Какие метрологические характеристики средств измерений вы знаете?
- Как связаны метрологические характеристики средств измерений с качеством измерений, которые выполняются с помощью этих средств?
- Предполагается проводить однократные измерения. Какие критерии используются при выборе средств измерений, какие из этих критериев наиболее важны?

## Терморезисторные измерительные преобразователи.

### Измерение температуры

**Цель:** Ознакомление с устройством и применением терморезисторных измерительных преобразователей (термисторов), изучение их функций преобразования, измерение температуры при помощи термистора и знакомство с современными средствами сбора и обработки экспериментальных данных.

#### 1. Сведения, необходимые для выполнения работы

Повторите вопросы обработки и представления результатов прямых и косвенных измерений и, используя рекомендованную литературу [4,16-20], настоящее описание и приложение 1 к Практикуму, ознакомьтесь со следующими вопросами:

- Основные характеристики измерительных преобразователей.
- Принцип действия, устройство и характеристики терморезисторных преобразователей.
- Методы измерения сопротивления.
- Причины возникновения и способы исключения или учета погрешностей при измерении сопротивления.
- Схемы включения и измерительные цепи терморезисторных преобразователей.
- Устройства и характеристики средств измерений, используемых при выполнении данной работы.

Терморезистором называется параметрический измерительный преобразователь, активное сопротивление которого изменяется при изменении температуры. Терморезисторные преобразователи бывают металлические и полупроводниковые. Последние называются *термисторами*.

Чувствительным элементом металлического терморезистора является тонкая медная или платиновая проволока. Проволока бифилярно наматывается на каркас из изоляционного и теплостойкого материала. Чувствительный элемент помещается в металлическую защитную гильзу (трубку с запаянным концом). Для подключения преобразователя к соответствующему вторичному прибору имеются специальные зажимы.

Измерители температуры с терморезисторами называются термометрами сопротивления. Платиновые терморезисторы используются для измерения температуры в диапазоне от  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , медные - в диапазоне от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Функции преобразования медных и платиновых терморезисторов стандартизированы и задаются градуировочной таблицей. Сопротивление терморезисторов при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  равно 10, 50 или 100 Ом, что отражается в обозначении терморезисторов, а именно: ТСМ10, ТСМ50 и ТСМ100. Медные терморезисторы дешевы и имеют почти линейную зависимость сопротивления  $R_t$  от температуры  $t$ , выражаемую формулой

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha t), \quad (4.1)$$

где  $R_0$  - сопротивление преобразователя при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha$  - температурный коэффициент, равный  $4,28 \cdot 10^{-3}\text{ }1/^{\circ}\text{C}$ .

Термисторы представляют собой композиции различных окислов металлов, имеющих большое удельное сопротивление, которое сильно зависит от температуры. Композиция окислов запекается в виде бусинки, шарика или стержня, к ним привариваются выводные провода. Для предохранения от атмосферного влияния бусинки или стержни покрываются краской или помещаются в металлический корпус.

Термисторы изготавливаются с номинальным сопротивлением (при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) от 1 до 200 кОм. В зависимости от типа они могут применяться для измерения температуры от  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $120\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Их чувствительность в 6-10 раз больше, чем у металлических терморезисторов. Функция преобразования - зависимость сопротивления термистора  $R_t$  от его температуры  $T^{\circ}\text{K}$  - может быть выражена формулой

$$R_t = A \cdot \exp(B/T). \quad (2.1)$$

Коэффициенты  $A$  и  $B$  - постоянные величины, зависящие от материала термистора и технологии его изготовления.

Термисторы имеют малые габариты, вес и теплоемкость, вследствие этого они могут использоваться для измерения температуры объектов, имеющих малые размеры и малую теплоемкость. Малая теплоемкость обуславливает их малую инерционность.

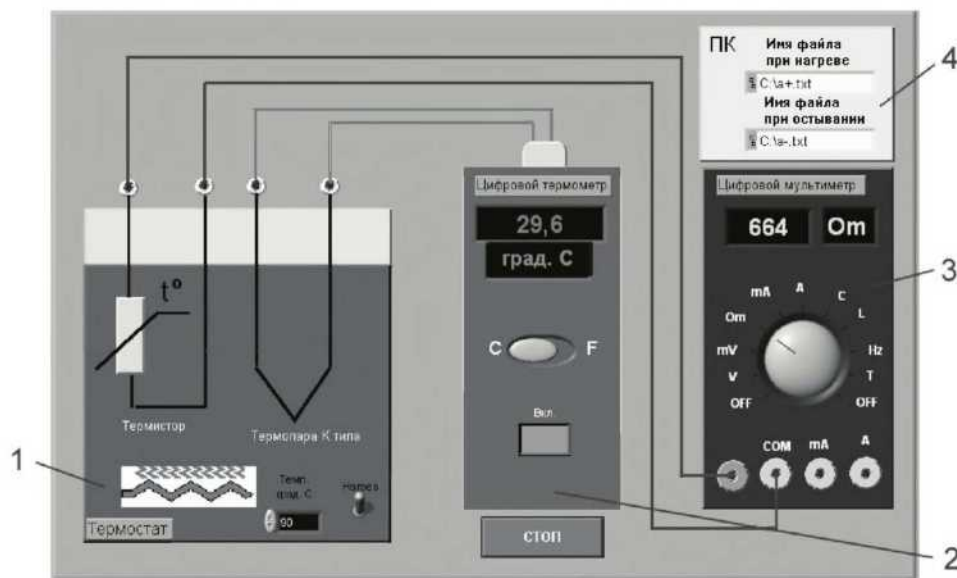
Недостатком термисторов являются нелинейность функции преобразования и большой разброс параметров  $A$  и  $B$ . Поэтому приборы с термисторами приходится градуировать индивидуально.

Недостатком термисторов являются также изменение во времени (старение) и некоторая нестабильность электрических характеристик. Однако после старения, которое обычно длится 2-4 месяца, дальнейшее

изменение сопротивления происходит медленно и не превышает 0,2% в год.

## 2. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой ZetView компьютерную модель, располагающуюся на рабочем столе персонального компьютера. На стенде (рис. 4.1.1) находятся модели водяного термостата, цифрового термометра и цифрового мультиметра.



**Рисунок 1. Вид модели лабораторного стенда на рабочем столе компьютера при выполнении лабораторной работы 2:**

1 - водяной термостат с установленными термистором и термопарой, 2 - цифровой термометр, 3 - цифровой мультиметр, 4 - персональный компьютер

Модели средств измерений (см. приложение 1) при выполнении работы используются для решения следующих задач.

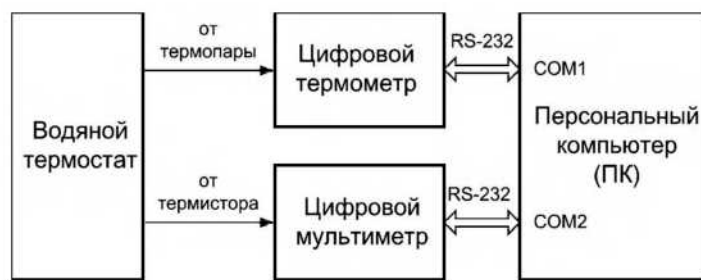
Модель термостата служит для задания температурного режима, необходимого для исследования характеристик модели термистора.

Модель цифрового мультиметра обеспечивает измерение сопротивления термистора.

При помощи модели цифрового термометра, снабженного термоэлектрическим преобразователем, производится образцовое измерение температуры.

Модель персонального компьютера осуществляет сбор данных со средств измерений и запись их в файлы.

Схема соединения приборов при выполнении работы 4.1 приведена на рис. 4.1.2. В качестве персонального компьютера, изображенного на рисунке, используется компьютер, на котором выполняется работа.



*Рисунок 2 - Схема соединения приборов при выполнении работы*

В термостат помещены термоэлектрический преобразователь, являющийся измерительным преобразователем цифрового термометра, и термистор, характеристики которого экспериментально определяются в данной лабораторной работе. Сопротивление термистора измеряется цифровым мультиметром.

Цифровой мультиметр измеряет постоянный и переменный ток и напряжение, сопротивление, частоту, период, емкость, температуру и может работать в режиме с автоматическим выбором диапазона измерения. Цифровая шкала - трех- или четырехразрядная по выбору. Поскольку в данной лабораторной работе исследуется функция преобразования термистора, модель мультиметра работает в режиме измерения сопротивления с автоматическим выбором диапазона.

Цифровой термометр и цифровой мультиметр, модели которых используются в данной работе, имеют встроенные стандартные компьютерные интерфейсы RS-232, что позволяет подключать эти приборы к компьютеру и автоматизировать процесс измерений. Поэтому экспериментальные данные, получаемые во время проведения измерений, автоматически собираются и записываются в файлы для последующей обработки.

### 3. Задание к работе

Изучите описание работы и рекомендованную литературу. Продумайте свои действия за компьютером.

- Запустите программу лабораторного практикума и выберите лабораторную работу 4.1 «Терморезисторные измерительные преобразователи. Измерение температуры» в группе работ «Измерение неэлектрических величин». На рабочем столе компьютера автоматически появятся модель лабораторного стенда с моделями средств измерений и вспомогательных устройств (рис. 1) и окно



созданного в среде MS Excel лабораторного журнала, который служит для формирования отчета по результатам выполнения лабораторной работы.

- Ознакомьтесь с расположением моделей отдельных средств измерений и других устройств на рабочем столе. Включите модели средств измерений и опробуйте их органы управления. Понаблюдайте за видом моделей.
- Приготовьте к работе проверенный на отсутствие вирусов мобильный носитель информации и подключите его к компьютеру.

В соответствующих элементах интерфейса пользователя правильно задайте имена файлов, предназначенных для записи данных при нагреве и остывании термостата. По умолчанию данные пишутся на жесткий диск компьютера: при нагреве - в файл **C:\a+.txt**, а при остывании - в файл **C:\a-.txt**. Оба файла имеют текстовый формат.

- Приступите к выполнению работы.

### *Задание 1. Опытное определение функции преобразования термистора*

- Включите цифровой термометр и цифровой мультиметр, установив последний в режим измерения сопротивления.
- Убедитесь, что имена файлов для записи данных введены правильно.
- На водяном термостате установите в соответствии с указаниями преподавателя максимальную температуру нагрева.
- Включите термостат и наблюдайте за процессами его нагрева и остывания. При нагреве сопротивление термистора падает, а при остывании - растет. Дождитесь окончания этих процессов. Все полученные данные измерений будут сохранены в файлах.

### *Задание 2. Обработка экспериментальных данных*

Обработка экспериментальных данных, сохраненных в файлах, производится в лабораторном журнале средствами MS Excel.

- На листе *Нагрев* лабораторного журнала в ячейки столбцов *Температура в термостате t, град. С* и *Измеренное значение сопротивления термистора  $R_{t3KSn+}$ , Ом* (см. табл. 4.1.1) поместите данные двумерного массива, считанного из файла **a+.txt**.
- Заполните следующие два столбца указанной таблицы, перейдя к температурной шкале Кельвина  $T = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273 \text{ } ^\circ\text{C}$  и найдя обратные значения  $1/T$ , постройте экспериментальную зависимость сопротивления термистора от обратного значения температуры  $1/T$  при нагреве водяного термостата.

с. Постройте на той же диаграмме зависимость вида  $R_{tm+} = A_+ \cdot \exp(B_+ \cdot x)$ , где  $x = 1/T$ , используя пункт меню *Диаграмма/Добавить линию тренда*.

d. Определите по полученным данным параметры функции преобразования  $A_+$  и  $B_+$  термистора. Для этого среди параметров линии тренда выделите галочкой пункт *Показывать уравнение на диаграмме*, тогда на диаграмме появится уравнение модели.

e. В соответствии с полученным уравнением модели заполните последний столбец таблицы *Посчитанное по математической модели значение сопротивления термистора  $R_{tm+}$ , Ом*.

f. Постройте на другой диаграмме зависимости  $R_{,,}$ ,  $..$  и  $R_{tm+}$  от температуры  $t^\circ\text{C}$ .

g. На листе *Остывание* лабораторного журнала в ячейки столбцов *Температура в термостате  $t$ , град. С* и *Измеренное значение сопротивления термистора  $R_{tЗКсн}$ , Ом* (см. табл. 4.1.2) поместите данные двумерного массива, считанного из файла **a.txt**.

a. Аналогично п. b заполните следующие два столбца указанной таблицы и постройте экспериментальную зависимость сопротивления термистора от обратного значения температуры  $1/T$  при остывании водяного термостата, где  $T = t^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C}$  - абсолютная температура.

b. Постройте на той же диаграмме зависимость вида  $R_{tm-} = A_- \cdot \exp(B_- \cdot x)$ , где  $x = 1/T$ , используя пункт меню *Диаграмма/Добавить линию тренда*. Считайте сохраненный файл на отдельный лист MS Excel и изучите полученные данные.

j. Определите по полученным данным параметры функции преобразования  $A$  и  $B_-$  термистора.

к. Постройте на одной диаграмме зависимости  $R_{,}$  и  $R_{,,}$  от температуры  $t^\circ\text{C}$ .

1. Определите максимальную и минимальную чувствительности термистора.

т. Определите максимальную и минимальную относительные погрешности измерения температуры, полагая, что измерение сопротивления производится с погрешностью, лежащей в пределах  $\pm 0,1$  Ом.

п. Сформулируйте и запишите в отчет выводы о проделанной работе.

1.2. Сохраните результаты.

После сохранения результатов закройте приложение ZetView и, при необходимости, выключите компьютер.

Таблица 1. *Исследование характеристики терморезистора при нагреве термостата*

| Температура Измеренное      | Температура        | 1/T | Посчитанное по мате           |
|-----------------------------|--------------------|-----|-------------------------------|
| в термостате t, °C значение | в термостате T, °K |     | матической модели             |
| сопротивления               |                    |     | значение сопротивле           |
| термистора                  |                    |     | ния термистора $R_{tm+}$ , Ом |
| $R_{эксп}$ , Ом             |                    |     |                               |

Таблица 2. *Исследование характеристики терморезистора при остывании термостата*

| Температура Измеренное      | Температура        | 1/T | Посчитанное по мате           |
|-----------------------------|--------------------|-----|-------------------------------|
| в термостате t, °C значение | в термостате T, °K |     | матической модели             |
| сопротивления               |                    |     | значение сопротивле           |
| термистора                  |                    |     | ния термистора $R_{tm-}$ , Ом |
| $R_{эксп}$ , Ом             |                    |     |                               |

#### 4. Оформление отчета

Отчет должен содержать:

- сведения о цели и порядке выполнения работы;
- сведения об использованных методах измерений;
- сведения о характеристиках использованных средств измерений;
- необходимые электрические схемы;
- данные расчетов, проводившихся при выборе средств и диапазонов измерений, при выполнении соответствующих пунктов задания;
- экспериментальные данные;
- полностью заполненные таблицы отчета (см. табл. 1 и табл. 2), а также примеры расчетов, выполнявшихся при заполнении таблицы;
- графики и диаграммы;
- анализ полученных результатов и выводы об особенностях и качестве проведенных измерений и в целом по результатам проделанной работы.

#### 5. Контрольные вопросы

- Какие физические явления лежат в основе функционирования терморезисторов?
- Какие материалы используются при изготовлении терморезисторов?
- Какова конструкция металлического терморезистора?
- Как устроены полупроводниковые терморезисторы (термисторы)?
- Каковы функции преобразования металлического и полупроводникового терморезистора?

- Когда и для каких целей используется трехпроводная схема подключения терморезистора?
- Почему в случае применения полупроводникового терморезистора (термистора) нет необходимости использовать трехпроводную схему?
- Каковы достоинства и недостатки медного терморезистора?
- Каковы достоинства и недостатки термистора?
- В каких случаях необходимо использовать платиновые терморезисторы?
- Какие из терморезисторов отличаются высокой чувствительностью?

## Емкостные измерительные преобразователи. Измерение размера

**Цель работы:** Ознакомление с устройством и применением емкостного измерительного преобразователя на примере измерителя диаметра проводящего стержня, знакомство и получение навыков работы с гетеродинным измерителем емкости.

### 1. Общие сведения

Повторите вопросы обработки и представления результатов прямых и косвенных измерений и ознакомьтесь со следующими вопросами:

- Основные характеристики измерительных преобразователей.
- Принцип действия, устройство и характеристики емкостных преобразователей.
- Методы измерения емкости.
- Причины возникновения и способы исключения или учета погрешностей при измерении емкости.
- Схемы включения и измерительные цепи емкостных преобразователей.
- Устройства и характеристики средств измерений, используемых при выполнении данной работы.

При измерениях размера в технике и при выполнении исследований широко используются емкостные преобразователи (емкостные датчики), относящиеся к группе параметрических датчиков. Такие датчики отличаются конструктивной простотой, надежностью и малой стоимостью. Однако в силу особенностей функционирования они требуют довольно сложного вторичного оборудования.

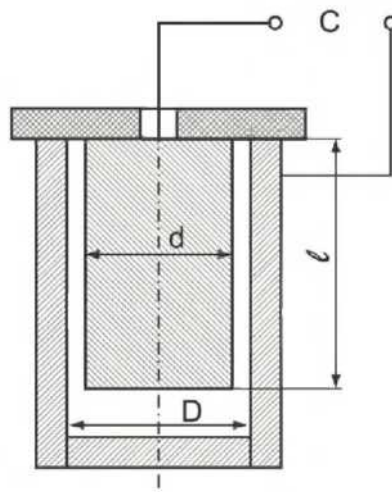
Емкостный преобразователь представляет собой конденсатор, электрические параметры которого изменяются под воздействием измеряемой величины. Широко используется конструкция, представляющая собой плоский конденсатор, емкость которого определяется выражением

$$C = \epsilon \epsilon_0 Q / \delta,$$

где  $\delta$  - расстояние между электродами (пластинами) конденсатора,  $Q$  - площадь пластин,  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды между пластинами,  $\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная вакуума, равная  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  Ф/м.

Изменение любого из параметров  $\gamma$ ,  $Q$ ,  $\epsilon$  изменяет емкость конденсатора, поэтому если измеряемая величина связана известным соотношением с каким-либо из указанных параметров, то ее значение может быть определено по результатам измерения емкости конденсатора.

В данной лабораторной работе используется емкостный преобразователь, представляющий собой цилиндрический конденсатор, одним из электродов которого является металлический стержень, расположенный внутри полого металлического цилиндра, охватывающего этот стержень (рис. 1).



**Рисунок 1. - Конструкция емкостного преобразователя**

Как известно, емкость идеального цилиндрического конденсатора равна

$$C = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot l / \ln(D/d), \quad (3.1)$$

где  $l$  - длина электродов,  $D$  - внутренний диаметр внешнего электрода,  $d$  - наружный диаметр внутреннего электрода - стержня.

Емкость реального цилиндрического конденсатора больше емкости, определяемой формулой (4.2.1), поскольку к емкости между цилиндрическими поверхностями добавляется емкость между торцевыми поверхностями стержня и внешнего цилиндра. В реальных условиях измерения к этой емкости добавляется емкость кабеля  $C_k$ , служащего для

подключения датчика к вторичной аппаратуре, измеряющей емкость. Полная емкость датчика с соединительным кабелем описывается выражением:

$$C = C_k + \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln(D/d)}, \quad (3.2)$$

или в более общем виде

$$C = A + \frac{B}{\ln(D/d)}. \quad (3.3)$$

Измерение емкости датчика в настоящей лабораторной работе производится с помощью гетеродинного прибора для измерения емкости и индуктивности (LC-измерителя). Структурная схема прибора приведена на рис. 4.2. В состав прибора входят два LC-генератора синусоидального напряжения ( $\Gamma$  и  $\Gamma_0$ ). Частота электрического сигнала, генерируемого LC-генератором, равна:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.4)$$

где  $L$  и  $C$  индуктивность и емкость контура задающего генератора. Рабочая частота генераторов в используемом приборе составляет несколько сотен килогерц.

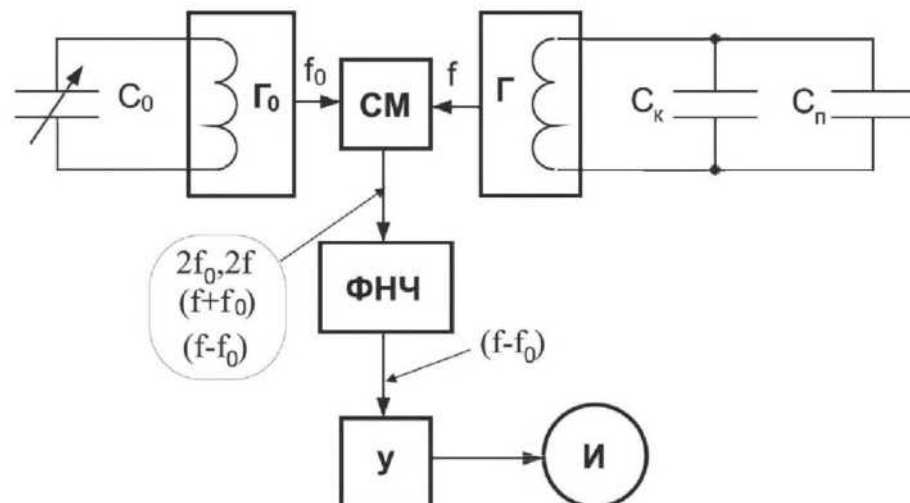


Рисунок 2.- Структурная схема гетеродинного LC-измерителя

При измерении емкости в приборе используются две одинаковые внутренние катушки индуктивности. В образцовом генераторе  $\Gamma_0$  в качестве частотно-задающего конденсатора используется набор образцовых

конденсаторов  $C_2$ ,  $C_3$  результирующая емкость которого  $C_0$  равна сумме емкостей этих конденсаторов. В генераторе  $\Gamma$  в качестве частотно-задающего используется конденсатор емкостного преобразователя  $C_{,,}$ , емкость которого подлежит измерению. При выполнении работы следует учитывать, что при проведении измерений к емкости преобразователя  $C_{\Pi}$  добавляется емкость кабеля  $C_k$  и иных элементов конструкции преобразователя, соединяющего преобразователь с измерителем. Таким образом, частота генератора  $\Gamma$  определяется суммой емкостей  $C = C_k + C_{\Pi}$ .

Напряжения генераторов  $\Gamma$  и  $\Gamma_0$  подаются в смеситель  $СМ$ , который формирует спектр частот на своем выходе. Смеситель представляет собой нелинейную электрическую цепь, на выходе которой образуется напряжение, имеющее сложный гармонический состав. В общем случае в этом спектре возможно появление любых гармоник из набора  $(mf \pm nf_0)$ , где тип- целые числа. В рассматриваемом приборе частоты генераторов  $\Gamma$  и  $\Gamma_0$ , как указывалось выше, имеют порядок сотен килогерц, удвоенные и суммарные частоты имеют такой же порядок, а разностная частота  $A = f - f_0$  лежит в звуковом диапазоне и приближается к нулю при стремлении  $f_0$  к  $f$ .

Поскольку у генераторов  $\Gamma$  и  $\Gamma_0$  одинаковые контурные катушки, частота  $f_0$  приближается к  $f$  при настройке образцового конденсатора, когда его емкость  $C_0$  приближается к емкости  $C_k + C_{,,}$ . Напряжение разностной частоты  $Af$  проходит через фильтр низких частот (ФНЧ) с полосой от 0 до 4500 Гц, усиливается и подается на индикатор, в то время как напряжения с более высокими частотами ФНЧ ослабляются. Индикатор мигает с частотой  $Af$ . Мигания индикатора становятся хорошо заметны, если эта частота меньше 20 Гц. Когда частоты  $f_0$  и  $f$  и соответственно емкости  $C_0$  и  $C_k + C_{\Pi}$  равны друг другу, мигание прекращается, и индикатор горит постоянно. Значение  $C_0$  определяется путем считывания значений емкостей  $C_2$ ,  $C_3$  со шкал прибора и их дальнейшего суммирования.



## 2. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой ZetView компьютерную модель, располагающуюся на рабочем столе персонального компьютера. На стенде (рис. 4.2.3) находятся модели емкостного измерителя размеров и гетеродинного LC-измерителя.

Модели средств измерений (см. приложение 1) при выполнении работы используются для решения следующих задач.

Модель емкостного измерителя размеров используется при моделировании процесса косвенных измерений диаметра проводящего стержня.

Модель гетеродинного LC-измерителя используется при моделировании процесса прямых измерений емкости емкостного измерителя размеров методом гетеродинирования, являющегося вариантом метода сравнения измеряемой величины с мерой.

Схема соединений приборов при выполнении работы видна на рис. 3.

## 3. Задание к работе

Изучите описание работы и рекомендованную литературу. Продумайте свои действия за компьютером.

- Запустите программу лабораторного практикума «Измерение неэлектрических величин». На рабочем столе



**Рисунок 3. - Вид модели лабораторного стенда на рабочем столе компьютера при выполнении лабораторной работы 4.2**

1 - емкостный измеритель размеров, 2 - гетеродинный LC-измеритель компьютера автоматически появятся модель лабораторного стенда с моделями средств измерений и вспомогательных устройств (рис. 3) и окно созданного в среде MS Excel лабораторного журнала, который служит для формирования отчета по результатам выполнения лабораторной работы.

- Ознакомьтесь с расположением моделей отдельных средств измерений и других устройств на рабочем столе. Включите модели средств измерений и опробуйте их органы управления. Понаблюдайте за видом модели емкостного преобразователя при выборе стержней различных диаметров  $d$ . Плавно изменяя положение ручек  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , проследите за изменением  $A_f$  и видом индикатора LC-измерителя при выбранном стержне.
- Приготовьте к работе проверенный на отсутствие вирусов мобильный носитель информации и подключите его к компьютеру.
- Установите ручки управления образцовых конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  на нулевые отметки.
- Приступите к выполнению работы.

*Задание 1. Измерение емкости кабеля, соединяющего емкостной преобразователь с LC-измерителем*

- a. Включите LC-измеритель.
- b. Выберите состояние емкостного преобразователя «БЕЗ СТЕРЖНЯ».
- c. Вращением ручек переменных конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  добейтесь появления на индикаторе мигания зеленого сектора.
- d. Наблюдая за изменением частоты  $A_f$ , настройте значения емкостей  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  таким образом, чтобы индикатор прекратил мигать, а разностная частота  $A_f$  была бы максимально приближена к нулевому значению. При выполнении точной настройки используйте дополнительные цифровые элементы управления, имеющиеся у каждой из ручек управления.
- e. Произведите отсчет значения емкости кабеля  $C_{Кi} = C_{и} + C_{щ} + C_{3i}$ . Полученные значения занесите в табл. 4.2.1.
- f. Проведите новые измерения емкости кабеля, доведя их полное число до десяти ( $n = 10$ ). Перед каждым новым измерением нажимайте кнопку «НОВОЕ ИЗМЕРЕНИЕ», а затем повторяйте действия, изложенные в пп. c-e.
- g. Вычислите среднее значение результатов измерения емкости кабеля  $C_{\text{ср}}$ , отклонения  $AQ$  каждого из измеренных значений от среднего значения и квадраты этих отклонений  $(\Delta C_i)^2$ .
- h. Вычислите среднеквадратическое значение погрешности измерения

емкости кабеля по формуле 
$$\sigma_{\Delta C} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta C_i)^2}{n-1}},$$
 где  $\Delta C_i$  - отклонение результата  $k$ -го измерения от среднего значения,  $n$  - число измерений,

i. Убедитесь, что табл. 4.2.1 заполнена полностью, и сохраните результаты.

*Задание 2. Измерение емкостей измерительного преобразователя при установке стержней различных диаметров*

a. Выберите состояние емкостного преобразователя с установленным стержнем № 1 «Стержень  $d = 0,4$  см»,

b. Измерьте емкость преобразователя и запишите полученные значения  $C_{и}$ ,  $C_{2и}$ ,  $C_{3и}$  и  $C_j = C_{1i} + C_{2i} + C_{3i}$  в табл. 4.2.2 аналогично тому, как это производилось в предыдущем задании (см. пп. с-е задания 1).

c. Нажмите кнопку «НОВОЕ ИЗМЕРЕНИЕ», что в данном случае моделирует поворот стержня в преобразователе на  $90^\circ$ . Затем повторите п. б.

d. Повторите п. с еще два раза.

e. В результате выполнения предыдущего пункта в табл. 4.2.2 должно быть записано достаточное количество опытных данных для ее полного заполнения. Для этого рассчитайте среднее значение, отклонения от среднего значения, квадраты отклонений и среднеквадратическое значение.

f. Повторите ц. а-е для других 10 стержней с номерами от 2 до 11. Каждый раз заполняйте новую таблицу со структурой табл. 4.2.2.

*Задание 3. Определение функции преобразования емкостного преобразователя*

a. В табл. 4.2.3 перенесите значения емкостей измерительного преобразователя, полученных при выполнении заданий 1 и 2. При этом в строку с нулевым номером запишите  $C$ , то есть емкость преобразователя без стержня. В других же строках должны быть записаны средние емкости преобразователя со стержнями, номера которых совпадают с номером строки (1-11).

b. Рассчитайте значения  $X$ , равные  $X = 1/\ln(D/d)$ ,

где диаметр  $D = 1,5$  см. Заполните этими значениями четвертый столбец табл. 4.2.3 (столбец  $D$  таблицы Excel).

c. Постройте диаграмму зависимости  $C$ , от  $X$ ,

d. На той же диаграмме постройте средствами MS Excel линейную математическую модель  $C_{inj} = A + BX_j$  (см. формулу 4.2.3). Для этого используйте пункт меню *Диаграмма/Добавить линию тренда*.

e. На точечной диаграмме выделите галочкой пункт *Показывать уравнение на диаграмме* и затем определите значения  $A$  и  $B$ . Зная уравнение модели, заполните предпоследний и последний столбцы табл. 4.2.3.

- f. Постройте другую диаграмму зависимости  $C_c$  от  $d_r$ . На ней же постройте полиномиальную модель шестой степени. Выведите на диаграмме уравнение модели.
- g. Сравните модели, полученные в пп. d и f, и сделайте выводы.
- 1.2. Сохраните результаты.
- 1.3. После сохранения результатов закройте приложение ZetView и, при необходимости, выключите компьютер.

#### 4. Оформление отчета

Отчет должен содержать:

- сведения о цели и порядке выполнения работы;
- сведения об использованных методах измерений;
- сведения о характеристиках использованных средств измерений;
- необходимые электрические схемы;
- данные расчетов, проводившихся при выборе средств и диапазонов измерений, при выполнении соответствующих пунктов задания;
- экспериментальные данные;
- полностью заполненные таблицы отчета, а также примеры расчетов, выполнявшихся при заполнении таблицы;
- графики;
- анализ полученных данных и выводы об особенностях и качестве проведенных измерений и по результатам проделанной работы.
- 

#### 5. Контрольные вопросы

1. Для измерения каких физических величин естественно применение емкостного измерительного преобразователя (емкостного датчика)?
2. Почему емкостные датчики работают на повышенных частотах переменного тока?
3. Какие схемы включения емкостного датчика вам известны?
4. Какими преимуществами обладает дифференциальная схема включения датчика?
5. Каков диапазон геометрических размеров, измеряемых с помощью емкостных датчиков?
6. Какие факторы являются существенными при применении емкостных датчиков для измерения малых размеров или малых перемещений?

7. В каких случаях имеет смысл применять емкостные датчики для измерения размеров, а в каких следует прибегнуть к другим датчикам или методам?
8. От чего зависит чувствительность емкостного датчика?
9. Каковы источники погрешностей емкостных датчиков?
10. Какими факторами определяются динамические свойства емкостных датчиков?

Лабораторная работа №4  
**Индуктивные измерительные преобразователи.  
Измерение перемещения**

**Цель:** Ознакомление с устройством и применением индуктивного измерительного преобразователя на примере измерителя перемещения, изучение метрологических характеристик измерительных преобразователей и схем их включения.

**1. Общие сведения**

Повторите вопросы обработки и представления результатов прямых и косвенных измерений и, используя литературу [4, 16 19], настоящее описание и приложение 1, ознакомьтесь со следующими вопросами:

- Основные характеристики измерительных преобразователей.
- Методы измерения индуктивности.
- Принцип действия, устройство и характеристики индуктивных преобразователей,
- Причины возникновения и способы исключения или учета погрешностей при измерении индуктивности.
- Схемы включения и измерительные цепи индуктивных преобразователей.
- Устройства и характеристики средств измерений, используемых при выполнении данной работы.

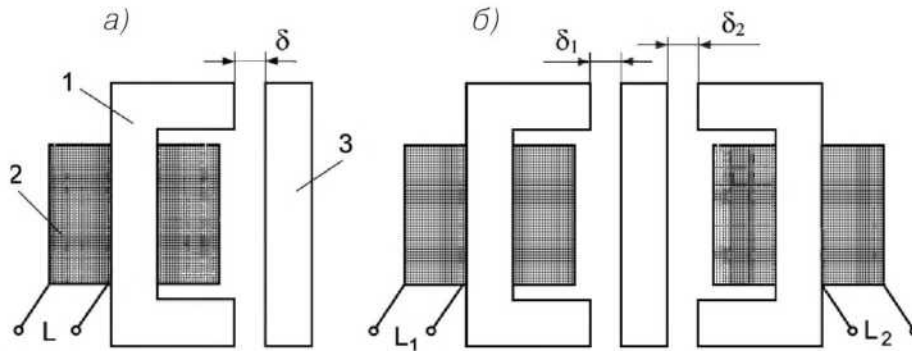
В технических и научных измерениях неэлектрических величин широко используются индуктивные преобразователи, относящиеся к группе параметрических датчиков. Они отличаются конструктивной простотой, надежностью и малой стоимостью. К тому же для своей работы они не требуют сколь-либо сложного вторичного оборудования.

Индуктивный преобразователь представляет собой дроссель, индуктивность которого изменяется под действием входной (измеряемой) величины. В измерительной технике используются конструкции преобразователя с переменным воздушным зазором и соленоидные (или плунжерные) преобразователи, которые и изучаются в данной работе.

Индуктивный преобразователь с переменным воздушным зазором схематически показан на рис. 4.3.1а. Он состоит из П-образного магнитопровода 1, на котором размещена катушка 2, и подвижного якоря 3. При перемещении якоря изменяется длина

воздушного зазора  $\delta$  и, следовательно, магнитное сопротивление. Это вызывает изменение магнитного сопротивления и индуктивности преобразователя  $L$ . При некоторых допущениях индуктивность преобразователя можно рассчитать по формуле

$$L = \frac{w^2 \mu_0 Q}{(2\delta + l_{ст}/\mu)}, \quad (4.1)$$



*Рисунок 1 - Конструкция индуктивного преобразователя с переменным воздушным зазором:*

*1 - П-образный магнитопровод, 2 - катушка, 3 - якорь:*

*а) одинарный преобразователь; б) дифференциальный преобразователь*

где  $w$  - число витков катушки,  $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$  Гн/м - магнитная постоянная,  $d$  - магнитная постоянная стали,  $Q$  - площадь сечения магнитного потока в воздушном зазоре (считаем, что площадь сечения магнитопровода также равна  $Q$ ),  $l_{ст}$  - средняя длина магнитной силовой линии по стали.

Одинарные индуктивные преобразователи имеют ряд недостатков, в частности их функция преобразования нелинейна, они могут иметь большую аддитивную погрешность, вызванную температурным изменением активного сопротивления обмотки, и ряд других.

Этих недостатков лишены дифференциальные преобразователи, которые представляют собой два одинарных преобразователя, имеющих общий якорь. На рис. 4.3.16 показан дифференциальный индуктивный преобразователь, состоящий из двух преобразователей, показанных на рис. 4.3.1а. При перемещении якоря, например, влево, индуктивность возрастает, а другая индуктивность  $L_2$  уменьшается.

Другой разновидностью индуктивных преобразователей являются плунжерные преобразователи. На рис. 4.3.2а показан одинарный плунжерный преобразователь, который представляет собой катушку 1, из которой может выдвигаться ферромагнитный сердечник 2 (плунжер). При среднем положении плунжера индуктивность максимальна.

Дифференциальный преобразователь, состоящий из двух одинарных преобразователей плунжерного типа, схематически изображен на рис. 4.3.26. Здесь также при перемещении плунжера одна индуктивность уменьшается, а другая увеличивается.

При использовании индуктивных преобразователей в качестве выходной величины обычно используется не индуктивность как таковая, а реактивное сопротивление преобразователя  $Z$ , которое, если пренебречь активной составляющей, равно  $Z = j\omega L$ .

Важной характеристикой любого преобразователя является его *чувствительность*. По определению, абсолютной чувствительностью называется отношение изменения выходной величины к изменению входной:

$$\dot{S}_{\text{абс}} = \frac{\Delta \dot{Z}}{x}, \quad (4.2)$$

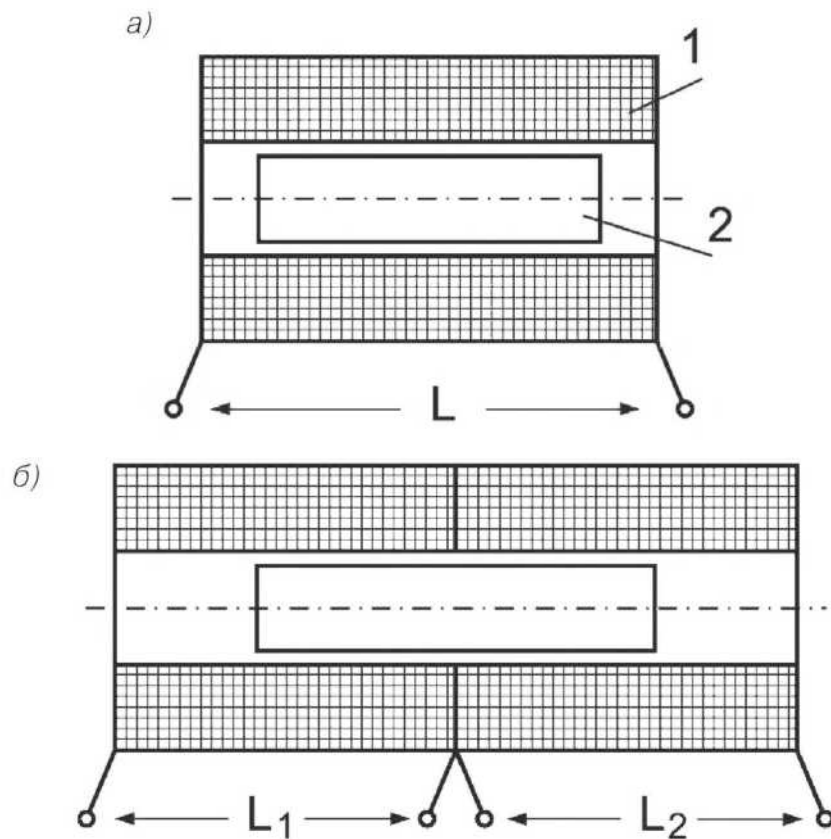


Рисунок 2 - Конструкция индуктивного плунжерного преобразователя (1 - катушка, 2 - плунжер): а) одинарный преобразователь; б) дифференциальный преобразователь

где  $\Delta Z$  - изменение сопротивления преобразователя, вызванное перемещением плунжера (или якоря) на расстояние  $x$ .



В некоторых случаях, например для сравнения преобразователей одного типа, но имеющих разные сопротивления, удобно пользоваться понятием относительной чувствительности (4.3)

$$\dot{S}_{\text{отн}} = \frac{\Delta \dot{Z}}{\dot{Z}_0} / x. \quad (4.3)$$

В этой формуле  $\dot{Z}_0$ - сопротивление преобразователя при  $x = 0$ .

В данной работе, говоря о чувствительности, мы будем иметь в виду относительную чувствительность.

Для измерения реактивного сопротивления дифференциальных индуктивных преобразователей используются мостовые схемы. Благодаря этому уменьшается аддитивная погрешность, улучшается линейность функции преобразования, в два раза увеличивается чувствительность и уменьшается сила притяжения якоря или плунжера. В мостовых схемах можно использовать различные схемы включения. Одна из основных таких схем для индуктивных дифференциальных преобразователей приведена на рис. 4.3.3. При таком включении  $L_y = j\omega L_1$  и  $Z_2 = j\omega L_2$  - индуктивные сопротивления дифференциального преобразователя, сопротивления других плеч  $R$  и сопротивление нагрузки  $R_H$  могут быть как активными, так и реактивными ( $B$  и  $B_H$  соответственно). В лабораторной работе используется мост, характеризующийся тем, что сопротивления катушек преобразователя имеют чисто индуктивное сопротивление, а другие сопротивления, входящие в измерительную схему, не содержат реактивных составляющих.

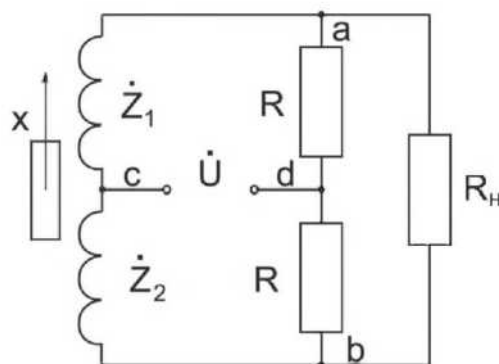


Рис. 4.3.3. Вариант схемы включения индуктивного преобразователя

Можно показать, что выходное напряжение, то есть напряжение на сопротивлении нагрузки  $R_H$ , для приведенной схемы включения описывается следующим выражением:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U}_{ab} = \frac{\dot{U}_{xx} R_H}{R_H + \dot{Z}_1},$$

где  $\dot{U}_{xx} \approx 2\dot{U}R\dot{Z}_0 / (\dot{Z}_0 + R)^2$  — напряжение холостого хода (при  $R_H = \infty$ ),

$\dot{Z}_i = 2\dot{Z}_0\bar{R}/(\dot{Z}_0 + \bar{R})$ ,  $\bar{R}$  - сопротивление каждого из активных плеч моста, а  $I$  напряжение питания моста.

Чувствительность мостовой схемы определяется выражением

$$\dot{S}_{cx} = \frac{2\dot{U}R\dot{Z}_0R_n}{(R + \dot{Z}_0)[2\dot{Z}_0R + R_n(R + \dot{Z}_0)]} \quad (4.4)$$

*Погрешности* индуктивных преобразователей в основном обусловлены изменением активной составляющей их сопротивлений. Эта погрешность аддитивна и уменьшается в случае применения мостовых схем. Кроме того, при изменении температуры изменяется магнитная проницаемость стали, что приводит к дополнительному изменению аддитивной и мультипликативной погрешностей. Изменения напряжения питания и его частоты также служат причиной изменения чувствительности и появления мультипликативных погрешностей.

## 2. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой ZetVIEW компьютерную модель, располагающуюся на рабочем столе персонального компьютера. На стенде (рис. 4.3.4) находятся модели индуктивного преобразователя, микрометрического винта, электронного милливольтметра, лабораторного макета и генератора сигналов.

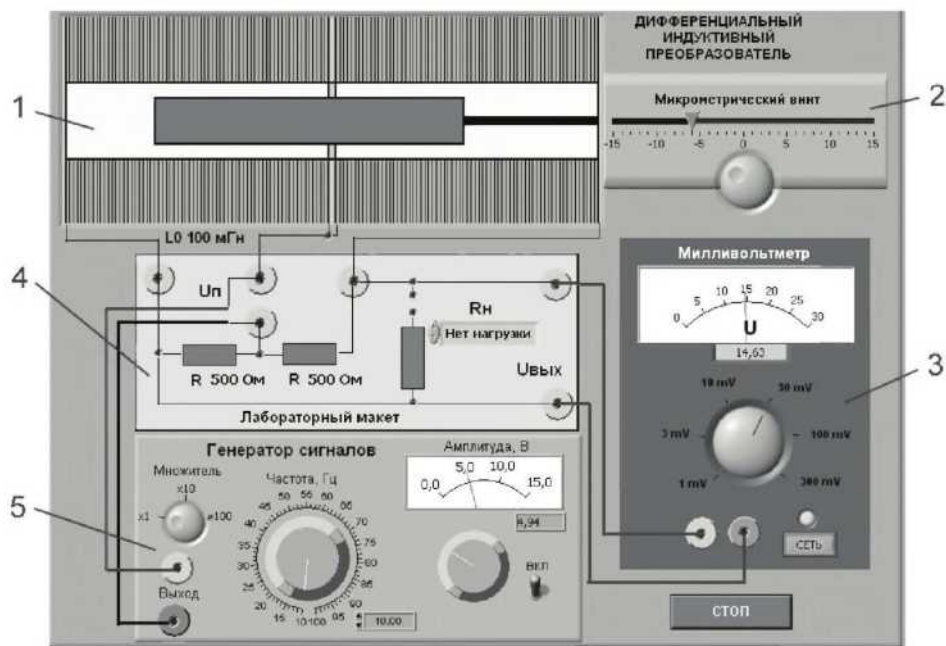


Рисунок.4. - Модель лабораторного стенда: 1 - индуктивный преобразователь, 2 - микрометрический винт, 3 - электронный милливольтметр, 4 - лабораторный макет, 5 - генератор сигналов

Модели средств измерений (см. приложение 1) при выполнении работы используются для решения следующих задач.

Модель индуктивного преобразователя используется при моделировании процесса измерений перемещения.

Модель микрометрического винта используется при моделировании процесса перемещения плунжера преобразователя.

Модель электронного милливольтметра используется при моделировании процесса измерения выходного напряжения измерительной схемы индуктивного преобразователя.

Лабораторный макет используется при моделировании процесса построения мостовой схемы индуктивного преобразователя с двумя активными сопротивлениями в плечах моста и выбираемым сопротивлением нагрузки из следующих значений: 300 Ом, 500 Ом, 1 кОм, 10 кОм, 20 кОм, 50 кОм.

Модель генератора сигнала служит для моделирования питания лабораторного макета гармоническим напряжением заданного значения и заданной частоты.

Схема соединений приборов при выполнении работы показана на рис. 4.

### **3. Задание к работе**

– Изучите описание работы и рекомендованную литературу. Продумайте свои действия за компьютером.

– Запустите программу лабораторного практикума и выберите лабораторную работу 4.3 «Индуктивные измерительные преобразователи. Измерение перемещений» в группе работ «Измерение неэлектрических величин». На рабочем столе компьютера автоматически появятся модель лабораторного стенда с моделями средств измерений и вспомогательных устройств (рис. 4.) и окно созданного в среде MS Excel лабораторного журнала, который служит для формирования отчета по результатам выполнения лабораторной работы.

– Ознакомьтесь с расположением моделей отдельных средств измерений и других устройств на рабочем столе. Включите модели средств измерений и опробуйте их органы управления. Понаблюдайте за видом модели индуктивного преобразователя при осуществлении различных перемещений при помощи микрометрического винта. Проследите также за изменениями напряжения, измеряемого милливольтметром. Ознакомьтесь с возможными изменениями измерительной схемы средствами лабораторного макета.

- Приготовьте к работе проверенный на отсутствие вирусов мобильный носитель информации и подключите его к компьютеру.
- Поставьте микрометрический винт на нулевое деление.
- Приступите к выполнению работы.

*Задание 1. Определение функции преобразования  $f_{xx}(x)$  комплекта, состоящего из индуктивного преобразователя и мостовой цепи, при холостом ходе*

а. Включите генератор сигналов и установите заданные преподавателем значения питающего напряжения  $U$  и его частоты  $f$  (рекомендованные значения  $U = 10$  В,  $f = 100$  Гц).

б. Переключатель нагрузки лабораторного макета установите в состояние «Нет нагрузки».

с. Включите милливольтметр и установите нужный предел измерений.

д. При снятии функции преобразования производите перемещением микрометрическим винтом в диапазоне  $\pm 15$  мм с шагом 1 мм от положения, в котором мост сбалансирован. Каждый раз производите отсчет значения напряжения на выходе лабораторного макета и записывайте его в соответствующую ячейку табл. 4.3.1.

е. По опытным данным постройте график функции преобразования и рассчитайте среднюю чувствительность исследуемого комплекта.

*Задание 2. Определение функции преобразования  $f(x)$  комплекта, состоящего из индуктивного преобразователя и мостовой цепи, при конечном значении сопротивления нагрузки*

а. Переключатель нагрузки лабораторного макета установите в состояние, соответствующее выбранному по указанию преподавателя сопротивлению нагрузки (например, «300 Ом»),

б. Повторите пункты с, д, е задания 1. Формирование таблицы и построение точечной диаграммы проводите на следующем листе лабораторного журнала.

с. По указанию преподавателя поставьте другое значение сопротивление нагрузки и повторите п. б.

д. Проанализируйте полученные функции преобразования  $f_{xx}(x)$ ,  $\hat{f}(x)$ ,  $f_2(x)$  и сделайте выводы.

**Таблица 1. - Функция преобразования комплекта индуктивного преобразователя и мостовой схемы включения  $u_n = V, f = \Gamma\Omega, FL = O\Omega$**

| Перемещениях, мм       | Выходное напряжение $U_{вых}$ , В |
|------------------------|-----------------------------------|
| -15                    |                                   |
| 0                      |                                   |
| 15                     |                                   |
| Чувствительность, В/мм |                                   |

- Сохраните результаты.
- После сохранения результатов закройте приложение ZetView и, при необходимости, выключите компьютер.

#### **4. Оформление отчета**

Отчет должен содержать:

- сведения о цели и порядке выполнения работы;
- сведения об использованных методах измерений;
- сведения о характеристиках использованных средств измерений;
- необходимые электрические схемы;
- данные расчетов, проводившихся при выборе средств и диапазонов измерений, при выполнении соответствующих пунктов задания;
- экспериментальные данные;
- три полностью заполненные таблицы отчета (см. табл. 4.3.1);
- графики;
- анализ полученных данных и выводы об особенностях и качестве проведенных измерений и по результатам проделанной работы.

#### **5. Контрольные вопросы**

1. Для измерения каких физических величин удобно применить индуктивный измерительный преобразователь?
2. Почему рабочая частота при использовании индуктивных преобразователей невысока?
3. Какие схемы включения индуктивного преобразователя вам известны?
4. Какими преимуществами обладает дифференциальная схема включения преобразователя?
5. В каком диапазоне значений обычно измеряют перемещения посредством индуктивных преобразователей?

6. Какие факторы являются существенными при применении индуктивных преобразователей для измерения малых размеров или малых перемещений?
7. В каких случаях имеет смысл применять индуктивные преобразователи для измерения размеров, а в каких следует прибегнуть к другим способам измерения?

Лабораторная работа №5  
**Термоэлектрические измерительные преобразователи.  
Измерение температуры**

**Цель работы:** Ознакомление с устройством и применением термоэлектрических измерительных преобразователей (термопар), изучение их функций преобразования, приобретение навыков измерения температуры, знакомство со вторичными приборами, работающими с термопарами, и с современными средствами сбора и обработки экспериментальных данных.

•

• **1. Сведения, необходимые для выполнения работы**

Повторите вопросы обработки и представления результатов прямых и косвенных измерений и, используя литературу [4, 16-20], настоящее описание и приложение 1, ознакомьтесь со следующими вопросами:

1. Основные характеристики измерительных преобразователей.
2. Принцип действия, устройство и характеристики термоэлектрических преобразователей.
3. Методы измерения напряжения постоянного тока.
4. Причины возникновения и способы исключения или учета погрешностей при измерении напряжения.
5. Порядок поверки измерительных приборов.

Если температуру  $\theta_1$  одного спая сделать отличной от температуры  $\theta_2$  другого спая, то в цепи потечет ток под действием ЭДС  $E_{12}$ , называемой термоэлектродвижущей силой (термоЭДС) и представляющей собой разность функций температур мест соединения проводников:

$$E_{12}(\theta_1, \theta_2) = f(\theta_1) - f(\theta_2).$$

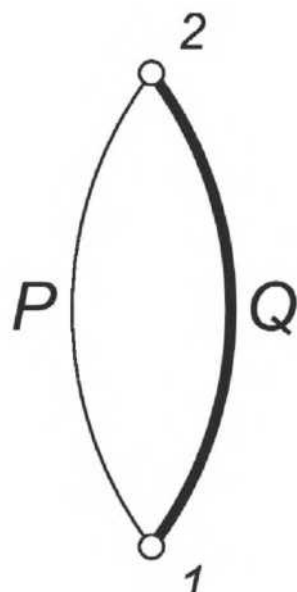


Рисунок 1 - Термоэлектрический преобразователь

Это свойство и используется при измерении температуры спая  $\theta_1$ . Для этого определяют функцию  $E(\theta_1, \theta_0)$  при  $\theta_0 = 0$  °С и используют полученную зависимость в качестве номинальной статической характеристики (НСХ) данной термопары, так как по ней можно определить температуру  $\theta_1$  если известно значение термоЭДС  $E(\theta_1, 0)$ . Если же температура свободного спая  $\theta_2$  отличается от температуры  $\theta_2 = 0$  °С, при которой была произведена градуировка термопары, то значение  $E(\theta_1, 0)$  определяется по формуле (4.4.2). При этом значение  $E(\theta_1, \theta_2)$  определяется экспериментально, а значение  $E(\theta_2, 0)$  - по значению температуры  $\theta_2$  при помощи НСХ. По вычисленному значению  $E(\theta_1, 0)$  посредством той же НСХ определяется измеряемая температура  $\theta_1$ .

Промышленностью выпускается широкая номенклатура термопар. В табл. 4.4.1 приведены сведения из Межгосударственного стандарта ГОСТ 6616-94 «Преобразователи термоэлектрические» о термоэлектрических преобразователях с металлическими термопарами, предназначенных для измерения температуры от -270 до +2500 °С.

**Таблица 1 - Классификация термопар**

| Тип термопары  | Обозначение типа | Обозначение номинальной статической характеристики |
|--|------------------|--|
| Платинородий-платиновые  | ТПП 13           | R  |
| Платинородий-платиновые  | ТПП 10           | S  |
| Платинородий-платинородиевые   | ТПР              | B  |
| Железо-кобальтовые (железо-медьникелевые)                                      | тжк              | J  |
| Медь-кобальтовые (медь-медьникелевые)  | тмк              | I  |
| Нихросил-нисиловые   | тнн              | N  |
| (никельхром-никель-никелькремниевые) Хромель-альюмелевые                       | ТХА              | K  |
| (никельхром-никель-алюминиевые) Хромель-кобальтовые (никельхром-медьникелевые) | ТХКн             | E  |
| Хромель-копелевые  | тхк              | L  |
| Медь-копелевые   | тмк              | M  |
| Сильс-силиловые  | тсс              | I  |
| Вольфрамрений-вольфрамениевые  | ТВР              | A-1, A-2, A-3                                      |

НСХ часто представляется в виде *градуировочной таблицы*. В приложении 6 приведена градуировочная таблица термопары J типа, используемой в данной работе в качестве образцового измерительного преобразователя.



Таким образом, термоэлектрические преобразователи используются для измерительного преобразования температуры в ЭДС. Сведения о характеристиках наиболее широко используемых термопар приведены в табл. 4.4.2. В зависимости от конструктивного исполнения термопары диапазон измеряемой температуры может несколько отличаться от приведенного в таблице.

Промышленная термопара устроена следующим образом. Термоэлектроды изолируются друг от друга керамическими бусами или керамическими трубками. Одни концы термоэлектродов свариваются, а другие присоединяются к зажимам головки, служащей для подключения внешних проводов. Чехол, в который помещаются термоэлектроды, делается из жаропрочной стали, а при измерении очень высоких температур - из керамики или кварца.

Место соединения термоэлектродов называется *горячим*, или *рабочим*, спаем. Противоположные концы называются *холодными*, или *свободными*. Обычно в месте свободного спая термопара разомкнута. ЭДС термопары чаще всего не превосходит 50 мВ. Рабочий конец термопары погружается в среду, температуру которой требуется измерить. Свободные концы подключаются к вторичному прибору. Если температура свободных концов постоянна, то подключение может быть сделано медным проводом, а если непостоянна, то оно выполняется специальными удлинительными (компенсационными) проводами. В качестве последних используются два провода из разных материалов. Провода подбираются так, чтобы при температуре свободных спаев и в паре между собой они имели такие же термоэлектрические свойства, как и рабочая термопара. При подсоединении к термопаре компенсационные провода удлиняют ее и дают возможность отвести холодный спай образованной составной термопары в такое место, где температура остается постоянной.

Вторичными преобразователями, измеряющими напряжение термопары и проградуированными в единицах измеряемой величины - температуры, служат магнитоэлектрические пирометрические милливольтметры, потенциометры постоянного тока, а в последнее время - цифровые средства измерений. В лабораторной практике используются потенциометры с ручной компенсацией, а в производственной - автоматические потенциометры.

Одним из источников погрешностей при измерении температуры с использованием термопар является несоответствие температуры их свободных концов температуре, при которой производилась градуировка.

Чтобы устранить эту погрешность, необходимо вводить поправку, что делается либо вручную, либо автоматически.

**Таблица 2 - Характеристики некоторых термопар**

| Тип по ГОСТ | Материалы термоэлектродов положительного | отрицательного                | Диапазон измеряемых температур, °С |
|-------------|--|-------------------------------|------------------------------------|
| ТЖК         | Железо, Fe                               | Константан, Cu-Ni             | -210... +1200                      |
| ТХА         | Хромель, Cr-Ni                           | Алюмель, Ni-Al                | -210... + 1372                     |
| ТМК         | Медь, Си                                 | Константан, Cu-Ni             | -210...+400                        |
| ТХКн        | Хромель, Cr-Ni                           | Константан, Cu-Ni             | -210... +1000                      |
| ТНН         | Нихросил, Ni-Cr-Si                       | Нисил, Ni-Si-Mg               | -210... +1300                      |
| ТШ1<br>3    | Платина-родий, Pt-Rh (13%)               | Платина, Pt                   | -50...+ 1768                       |
| ТШ1<br>163  | Платина-родий, Pt-Rh (10%)               | Платина, Pt                   | -50... + 1768                      |
| ТШР         | Платина-родий, Pt-Rh (30%)               | Платина-родий, Pt-Rh (6% Rh)  | 0...+1820                          |
| ТВР         | Вольфрам-рений, W-Re (5%)                | Вольфрам-рений, W-Re (26% Re) | 0...+2320                          |

Кроме того, возможно появление погрешности термоэлектрического термометра вследствие изменения сопротивления измерительной цепи. Правда, термометр с потенциометром свободен от указанной погрешности, поскольку в момент компенсации по внешней цепи ток не течет и на ее сопротивлении отсутствует падение напряжения. Напротив, показания пирометрического милливольтметра зависят от сопротивления источника термоЭДС и сопротивления соединительных проводов. Поэтому пирометрический милливольтметр должен работать с таким источником и такими соединительными проводами, при которых он градуировался.

## 2. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой ZetView компьютерную модель, располагающуюся на рабочем столе персонального компьютера. На стенде (рис. 4.4.2) находятся модели потенциометра постоянного тока, пирометрического милливольтметра (пирометра), термометра, а также модель электрической печи с помещенными в нее двумя термопарами - образцовой J-типа (же- лезо-константановой) и поверяемой K-типа (хромель-алюмелевой), входящий в комплект проверяемого прибора.



*Рисунок 2 - Модель лабораторного стенда:*

- 1 - электрическая печь с установленными термопарами J-типа и K-типа,  
2 - потенциометр постоянного тока,  
3 - пирометрический милливольтметр, 4 - термометр*

Модели средств измерений (см. приложение 1) при выполнении работы используются для решения следующих задач.

При помощи модели электрической печи производится имитация регулируемого изменения температуры, во время которого осуществляется поверка комплекта пирометра и термопары.

Модель потенциометра в комплекте с образцовой термопарой j-типа обеспечивает измерение термоЭДС с образцовой точностью.

Модель пирометрического милливольтметра (пирометра) служит поверяемым средством измерений в составе комплекта «термопара K-типа - пирометрический милливольтметр».

Модель термометра служит для определения температуры свободных концов образцовой термопары с целью внесения необходимой поправки.

Схема соединений приборов при выполнении работы ясна из рис. 2. Поверяемая термопара с соблюдением полярности подключена к пирометрическому милливольтметру. Образцовая термопара подключена к потенциометру, к его клеммам «Х», «ТУ» с соблюдением полярности.

## 2. Задание к работе

– Изучите описание работы и рекомендованную литературу. Продумайте свои действия за компьютером.

– Запустите программу «Термоэлектрические измерительные преобразователи. Измерение температуры». На рабочем столе компьютера автоматически появятся модель лабораторного стенда с моделями средств измерений и вспомогательных устройств (рис. 2.) и окно созданного в среде MS Excel лабораторного журнала, который служит для формирования отчета по результатам выполнения лабораторной работы.

– Ознакомьтесь с расположением моделей отдельных средств измерений и других устройств на рабочем столе.

– Ознакомьтесь с устройством и порядком работы с моделью потенциометра постоянного тока по приложению 1 Практикума и описанию работы 3.3 «Измерение постоянного напряжения методом компенсации». Модели потенциометра постоянного тока данной работы и работы 3.3 полностью одинаковы и моделируют режим «Измерение ЭДС и напряжений». Поэтому полученные ранее знания и навыки работы с потенциометром пригодятся и сейчас.

– После ознакомления с моделью потенциометра установите рабочие токи в его первом и втором контурах. Для этого выполните следующие действия:

1) Включите модель с помощью кнопки «СЕТЬ».

2) Переведите модель в режим потенциометра нажатием кнопки «П».

3) Подключите к схеме потенциометра встроенные гальванометр, батареи питания и нормальный элемент, нажав, соответственно, на кнопки «Г», «БП», «НЭ».

4) Нажмите кнопку А1 - гальванометр включится в цепь первого контура (см. рис. 3.3.3).

5) Установите рабочий ток первого контура, для чего, вращая ручки «рабочий ток 1» и «рабочий ток 2» вначале при нажатой кнопке (грубо), а затем при нажатой кнопке (точно), установите стрелку гальванометра на нулевую отметку.

6) Нажмите кнопку А2 - гальванометр включится в цепь второго контура (см. рис. 3.3.3).

7) Установите рабочий ток второго контура, для чего, вращая ручки «рабочий ток 1» и «рабочий ток 2» вначале при нажатой кнопке  $f_j$ , (грубо), а затем при нажатой кнопке [П (точно), установите стрелку гальванометра на нулевую отметку.

8) Изучите модель пирометрического милливольтметра и обратите внимание, что шкала пирометра проградуирована в градусах Цельсия, хотя его входной величиной является напряжение, снимаемое с термопары. Поэтому в общем случае необходимо знать соответствие значений входного напряжения показаниям прибора. Требуемое соответствие дается номинальной градуировочной характеристикой, связанной с типом применяемой термопары. Реальная характеристика может отличаться от номинальной, что приводит к погрешностям измерения температуры. Эти погрешности исключаются введением поправки, значение которой находится посредством поверки градуировки. Однако при выполнении данной

лабораторной работы определять и вводить поправку не нужно, так как предполагается, что реальная градуировочная характеристика не отличается от номинальной.

9) Изучите модель электрической печи. Выберите скорость нагрева электрической печи так, чтобы вы успевали во время одного шага роста температуры выполнить одно измерение термоЭДС и одну запись показаний потенциометра в лабораторный журнал. Скорость нагрева 10 град/мин соответствует продолжительности одного шага, равной 1 мин, скорость 5 град/мин - 2 мин, скорость 20 град/мин - 0,5 мин. Установите выбранную скорость, используя переключатель электрической печи «Скорость нагрева».

10) Приготовьте к работе проверенный на отсутствие вирусов мобильный носитель информации и подключите его к компьютеру.

11) Приступите к выполнению работы.

*Задание 1. Комплексная поверка пирометрического милливольтметра с термопарой К-типа (ТХА)*

а. Используя модель термометра, установите по указанию преподавателя значение температуры  $\theta_2$  свободных концов термопар (комнатную температуру). Запишите эту температуру во все ячейки столбца *Температура свободных концов*  $\theta_2$ , °C (столбца В) табл. 4.4.3.

б. Включите электрическую печь.

с. Наблюдайте за изменением показаний пирометра. Как только произойдет повышение температуры и стрелка установится на следующем делении, измерьте с помощью потенциометра термоЭДС. Для этого выполните следующие действия:

- с помощью кнопки  $\wedge$  переведите потенциометр в режим измерения;
- добейтесь компенсации измеряемого напряжения компенсирующим напряжением, для чего:

нажмите кнопку (грубо) и, вращая ручки декадных переключателей «x10 Ом(мВ)» и «x1 Ом(мВ)», установите стрелку гальванометра на нуль;

- нажмите кнопку (точно) и, вращая ручки декадных переключателей «x0Д Ом(мВ)» и «x0,01 Ом(мВ)», опять установите стрелку гальванометра на нуль; снимите показания потенциометра (значение измеренного напряжения в милливольтках будет равно сумме показаний декад регулировочного сопротивления потенциометра).

е. Запишите показание потенциометра в соответствующую ячейку столбца *Показание образцового потенциометра* E(01, Q2), мВ (столбца D) табл. 4.4.3.

- f. Повторяйте пп. с, d до достижения деления пирометра, соответствующего 400 °С, включительно.
- g. Если произошел сбой или ошибка при проведении какого-либо измерения, выполнение задания 1 надо начать заново.
- h. Заполните ячейки третьего, четвертого и пятого столбцов табл. 4.4.3. Для определения термоЭДС  $E(\theta_2, 0)$  воспользуйтесь градуировочной таблицей приложения 6. Для определения действительной температуры в печи  $\theta$ , можно также воспользоваться указанной градуировочной таблицей или утилитой TerJ.exe, которая имеется в составе программного обеспечения Практикума в папке XLS.
- i. Заполните ячейки шестого, седьмого и восьмого столбцов табл. 4.4.3. Для этого по полученным результатам определите действительную температуру в печи  $\theta$ , абсолютную  $A\theta$ , приведенную  $\delta\theta_{пр}$  погрешности измерения температуры  $\theta$ .
- j. Сделайте выводы. Выводы по проделанной работе должны содержать заключение, удовлетворяет ли поверяемый вторичный прибор своему классу точности. Для этого нужно определить максимальные значения абсолютной и приведенной погрешностей пирометрического комплекта и объяснить причины погрешности.

**Таблица 4.4.3.** Поверка пирометрического милливольтметра в комплекте с термопарой К-типа (ТХА)

| Показание поверяемого прибора $\theta$ , °С | Температура свободных концов $\theta_2$ , °С | ЭДС термопары J-типа $E(\theta_2, 0)$ , мВ | Показание образцового потенциометра $E(\theta_1, \theta_2)$ , мВ | $E(\theta_1, 0) = E(\theta_1, \theta_2) + E(\theta_2, 0)$ , мВ | Действительная температура в печи $\theta_1$ , °С | Абсолютная погрешность $\Delta\theta = \theta - \theta_1$ , °С | Приведенная погрешность $\delta\theta_{пр}$ , °С |
|---|--|--|--|--|---|--|--|
| 20  |  |  |  |  |   |  |  |
| 30  |  |  |  |  |   |  |  |
| ...   |  |  |  |  |   |  |  |
| 400   |  |  |  |  |   |  |  |

После сохранения результатов закройте приложение ZetView и, при необходимости, выключите компьютер.

#### 4. Оформление отчета

Отчет должен содержать:

- сведения о цели и порядке выполнения работы;
- сведения об использованных методах измерений;

- сведения о характеристиках использованных средств измерений;
- теоретическое введение должно содержать описание промышленных термопар, их свойства, диапазоны измерения, объяснение, как по ЭДС термопары определить измеряемую температуру, а также схемы, описания работы и свойства вторичных приборов; расчетные формулы, необходимые для выполнения работы;
- схемы и методы введения поправки в показания приборов, когда температура свободного спая термопары отлична от нуля;
- необходимые электрические схемы;
- данные расчетов, проводившихся при выборе средств и диапазонов измерений, при выполнении соответствующих пунктов задания;
- экспериментальные данные;
- полностью заполненные таблицы отчета (см. табл. 4.4.2), а также примеры расчетов, выполнявшихся при заполнении таблиц;
- графики;
  - анализ полученных данных и выводы об особенностях и качестве проведенных измерений и по результатам проделанной работы.

•  
•

### • **5. Контрольные вопросы**

1. Что называется термоэлектрическим преобразователем (термопарой)? В чем состоит термоэлектрический эффект?
2. Опишите устройство промышленной термопары.
3. Назовите основные типы промышленных термопар и их верхние пределы измерения.
4. Как рассчитывается температура по ЭДС термопары, имеющей ненулевую температуру свободных концов?
5. Как настраивается потенциометр постоянного тока (как регулируется его рабочий ток)?
6. Почему с помощью потенциометра можно измерить ЭДС? Опишите процедуру измерения ЭДС с помощью потенциометра.
7. Нарисуйте схему автоматического потенциометра и объясните принцип его действия.
8. Какие меры применены в автоматическом потенциометре для стабилизации значения рабочего тока?
9. Каким образом уменьшается погрешность измерения температуры, вызванная неноминальным значением температуры свободных концов термопары, если измерение производится с помощью автоматического потенциометра?

10. Сопротивление проводов, соединяющих термопару с потенциометром, изменилось. Вызовет ли это погрешность измерения температуры?
11. Сопротивление проводов, соединяющих термопару с пирометрическим милливольтметром, изменилось. Может ли это вызвать погрешность измерения температуры?
12. Нарисуйте схему устройства для автоматического введения поправки на температуру свободных концов термопары и объясните принцип его действия.
13. Каким образом вводится поправка на температуру свободных концов термопары в показания пирометрического милливольтметра, если температура свободных концов постоянна, но не равна нулю?