

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

Направление	12.03.01 - Приборостроение
Профиль	Информационно – измерительная техника и технологии
Факультет	ИБС
Кафедра	ИИСТ

К защите допустить

Зав. кафедрой

Алексеев В.В.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА**

**ТЕМА: РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ»
«ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ»**

Студентка		_____	Жаворонкова А.Д.
		<i>подпись</i>	
Руководитель	д.т.н., профессор (Уч. степень, уч. звание)	_____	Антонюк Е.М.
		<i>подпись</i>	
Консультанты	к.т.н., доцент (Уч. степень, уч. звание)	_____	Буканин В.А.
		<i>подпись</i>	
	к.т.н. (Уч. степень, уч. звание)	_____	Романцова Н.В.
		<i>подпись</i>	

Санкт-Петербург

2017

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

Утверждаю
Зав. кафедрой ИИСТ
_____ Алексеев В.В.
« ___ » _____ 2017 г.

Студентка Жаворонкова А.Д. Группа 3586

Тема работы: Разработка лабораторной работы по дисциплине «Измерительные преобразователи» «Термоэлектрический преобразователь»

Место выполнения ВКР: СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Исходные данные (технические требования): обзор литературы о применении термопар в промышленности и научных исследований, создание проекта лабораторной работы с использованием термопары, создание тестов для студентов, выполняющих лабораторную работу.

Содержание ВКР:

Введение, измерения температуры термопарами, термоэлектрические измерительные преобразователи, погрешности и пути повышения надежности термопар, методические указания к выполнению лабораторной работы.

Перечень отчетных материалов: текст ВКР, иллюстративный материал,

Дополнительные разделы: Безопасность жизнедеятельности

Дата выдачи задания
« ___ » _____ 20__ г.

Дата представления ВКР к защите
« ___ » _____ 20__ г.

Студентка _____ Жаворонкова А.Д.

Руководитель д.т.н., профессор _____ Антонюк Е.М.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Утверждаю
Зав. кафедрой ИИСТ
_____ Алексеев В. В.
«__» _____ 20__ г.

Студентка Жаворонкова А.Д. Группа 3586
Тема работы: Разработка лабораторной работы по дисциплине «Измерительные преобразователи» «Термоэлектрический преобразователь»

№ п/п	Наименование работ	Срок выполнения
1	Обзор литературы по теме работы	25.04 – 07.05
2	Основные теоретические сведения о термоэлектрических измерительных преобразователях	08.05 – 15.05
3	Термоэлектрические измерительные преобразователи, пути повышения надежности	16.05 – 21.05
4	Лабораторная работа	22.05 – 25.05
5	Оформление пояснительной записки	26.05 – 30.05
6	Оформление иллюстративного материала	02.06 – 05.06

Студентка _____ Жаворонкова А. Д.
Руководитель д.т.н., профессор _____ Антонюк Е. М.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 62 стр., 8 рис., 3 табл., 21 ист.

Ключевые слова: термоэлектрические измерительные преобразователи, лабораторная работа, измерительные преобразователи, методические указания, температура, термопара

Объектом исследования являются термоэлектрические измерительные преобразователи

Цель работы: разработка лабораторной работы по дисциплине «Измерительные преобразователи» «Термоэлектрические преобразователи».

Содержание: в данном дипломном проекте разрабатывается лабораторная работа для студентов 4 курса направления «Приборостроение» по дисциплине «Измерительные преобразователи» «Термоэлектрический преобразователь».

Результаты работы: проведен обзор действия термоэлектрических измерительных преобразователей, составлены методические указания для выполнения работы на лабораторном стенде, составлены тесты для студентов, выполняющих лабораторную работу, проанализированы вопросы безопасности жизнедеятельности, связанные с выполнением лабораторной работы в лаборатории.

ABSTRACT

Explanatory note 62 pages, 8 figures, 3 tables, 21 source.

Keywords: thermoelectric measuring transducers, laboratory work, measuring transducers, methodical instructions, temperature, thermocouple

The object of research are thermoelectric measuring transducers

Objective: development of laboratory work on the discipline "Measuring transducers" "Thermoelectric converters".

Content: in this work, a laboratory work is being developed for students of the 4th year of the "Instrument-Making" direction in the discipline "Measuring Converters" "Thermoelectric converters".

The results of the work: an overview of the operation of thermoelectric measuring transducers was made, methodological instructions for performing work on the laboratory stand were compiled, tests for students performing laboratory work were compiled, and vital issues related to laboratory work in the laboratory were analyzed.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1. Термоэлектрические ИП	11
1.1. Общие замечания по измерению температуры	11
1.2. Принцип действия термоэлектрических ИП. Материалы ИП.	14
1.3. Конструкция, градуировка термопар	22
1.4. Защита термопар от внешних воздействий	25
2. Погрешности и пути повышения надежности термопар	27
2.1. Основные сведения о погрешностях термопар	27
2.2. Статические погрешности термопар	27
2.3. Пути повышения надежности и точности измерений температуры с помощью термопар	31
3. Методические указания к лабораторной работе. Измерения температуры термопарами	39
3.1. Общие соображения, схемы	39
3.2. Поверка пирометрического милливольтметра	42
3.3. Измерение температуры термопарой в комплекте с милливольтметром и термопарой в комплекте с автоматическим потенциометром	44
3.4. Исследование влияния сопротивления соединительных проводов на автоматический потенциометр и милливольтметр	45
3.5. Задание для самостоятельного выполнения лабораторной работы	46
3.6. Тест по теме «Термопары»	47
4. Безопасность жизнедеятельности	50
4.1. Классификация опасных и вредных производственных факторов, обладающих свойствами физического воздействия на организм человека	50

4.2.	Классификация опасных и вредных производственных факторов, обладающих свойствами психофизиологического воздействия на организм человека	52
4.3.	Общие требования безопасности к условиям проведения лабораторных работ	53
4.4.	Общие требования безопасности к электротехническим изделиям	55
	Заключение	59
	Список использованных источников	60

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей пояснительной записке применяют следующие термины с соответствующими определениями:

ИП – измерительный преобразователь

СП – соединительные провода

Термо-ЭДС – электродвижущая сила, возникающая в электрической цепи, состоящей из нескольких разнородных проводников, контакты между которыми имеют различные температуры

ТП – термопара

УП – удлинительные провода

ЭП – электрическая печь.

ВВЕДЕНИЕ

Целью данного дипломного проекта является создание лабораторной работы по дисциплине «Измерительные преобразователи» для студентов 4 курса направления «Приборостроение», которая позволит им ознакомиться со свойствами и применением термоэлектрических преобразователей.

Роль измерений крайне важна при развитии цивилизации. С течением мировой истории человеку приходилось измерять различные вещи. Для этой цели понадобилось создать систему различных измерений, необходимую для вычисления объема, веса, длины, времени и т.п. Данные подобных измерений помогают освоить количественную характеристику окружающего мира. Современная жизнь без измерений не возможна. Именно с их помощью происходит формирование и управление различными технологическими процессами, а также контролирование качества выпускаемой продукции [1].

Измерительный преобразователь (ИП) представляет собой одно из средств измерений. Он является основой для построения технических средств получения информации от различных объектов. Измерительные преобразователи позволяют получать информацию от того или иного объекта в том виде, в каком информация может быть воспринята, обработана, передана, запомнена и т.п. В подавляющем большинстве случаев измеряемые физические величины преобразуются измерительными преобразователями в электрический сигнал.

Современные средства измерений позволяют непосредственно измерить более 200 различных физических величин – электрических, тепловых, акустических, механических и т.д. Тепловые величины представляют собой наибольшую по числу средств измерений группу, и их измерение составляет, по крайней мере, 50% от общего числа всех измерений [2].

В зависимости от физических свойств, положенных в основу принципа действия приборов для измерения температуры, приборы можно разделить

на механические термометры; манометрические термометры; термометры сопротивления и термоэлектрические термометры.

Механические термометры основаны на явлении теплового расширения тел (объемного и линейного). Манометрические термометры работают по принципу изменения давления жидкости, газа или пара с жидкостью в замкнутом объеме при нагревании или охлаждении этих веществ. Термометры сопротивления используют свойства металлических проводников изменять электрическое сопротивление при нагреве [3].

Термоэлектрические термометры представляют собой соединение термоэлектрического преобразователя (термопары) и того или иного средства измерения. В качестве средства измерения могут использоваться милливольтметры и компенсаторы постоянного тока [2]. Впервые эффект, на основе которого работает термопара, был исследован немецким ученым Томасом Зеэбеком. В замкнутом электрическом контуре, состоящем из двух разнородных проводников, при воздействии определенной температуры окружающей среды возникает электричество. Получаемый электрический поток и температура окружающей среды, воздействующая на проводники, находятся в линейной зависимости. То есть чем выше температура, тем больший электрический ток вырабатывается термопарой [4].

Термопары являются самым распространенным средством измерения температуры в промышленности и в научных учреждениях. Это связано с достоинствами термоэлектрических термометров – такими, как простота в изготовлении и эксплуатации, достаточная для большинства практических случаев точность измерения (погрешность в среднем не превышает значений в несколько кельвинов), наличие широкого парка измерительных приборов, рассчитанных на работу с термоэлектрическими преобразователями, невысокая стоимость термометров, высокие надежные характеристики, взаимозаменяемость, возможность автоматизации процесса измерений [5].

1. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИП

1.1. Общие замечания по измерению температуры

Температура является одним из наиболее часто встречающихся при измерениях неэлектрическим параметром. В ряде отраслей промышленности качество выпускаемой продукции определяется надежностью измерения в регистрации температуры, а в области научных исследований от точности измерения температуры в широком диапазоне часто зависит успех исследования. Область измерительной техники, занимающейся измерением температуры, называется пирометрией. Благодаря разнообразию требований, предъявляемых к измерительной аппаратуре в отношении диапазона температур, точности, чувствительности, – создание универсальных пирометрических приборов затруднено. Измерение температуры основано на изменении физических свойств тела, находящегося в тепловом контакте с исследуемым объектом.

Для количественного определения уровня измеряемой температуры пользуются температурными шкалами. Температурная шкала представляет собой численную зависимость, связывающую физические свойства какого-либо вещества и его температуру. При построении температурной шкалы, прежде всего, необходимо выбрать нулевую температуру t_0 , а так же основные или опорные точки, представляющие собой легко и точно воспроизводимые температуры t , неизменность которых определяется физическими константами (температура кипения, плавления или затвердевания химических чистых веществ). Установленный таким образом температурный интервал $t - t_0$ делят число n равных частей и считают 1 градус. Во всем температурном интервале принимают физические свойства тела и его температуру изменяющимися линейно. М.В. Ломоносов создал температурную шкалу, используя явление теплового расширения жидкостей. Основным температурным интервал он ограничил температурами таяния льда и кипения воды. Этот интервал в термометре Ломоносова был разбит на 150 делений. Предположе-

ние о линейности зависимости расширения веществ (ртути, спирта) от температуры не подтверждается практикой, вследствие чего показания дилатометрических термометров отличаются от действительной температуры во всех точках шкалы, кроме опорных точек (0 и 100 °С)

Для создания единой температурной шкалы, не связанной с какими-то частными свойствами вещества, используются законы термодинамики. Современные представления определяют температуру тел, как условную статистическую величину, прямо пропорциональную средней кинетической энергии частиц вещества (молекул, атомов). Абсолютному нулю температуры соответствует нулевая скорость движения и, следовательно, нулевая средняя кинетическая энергия частиц. Если какое-то значение энергии связать с определенным числом градусов температур, в которой одинаковым изменениям средней кинетической энергии частиц будут соответствовать одинаковые приращения температуры.

«В термодинамической шкале (шкале Кельвина) за нулевую отметку принята температура равновесия между твердой, жидкой и парообразной фазами чистой воды при нормальном давлении (тройная точка воды)» [6]. В международной системе единиц (СИ) за единицу измерения температуры принят Кельвин (К). Размер этой единицы определен ГОСТ 8.417-2002 как единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды. Кроме термодинамической температуры (обозначение T) допускается так же применять температуру Цельсия (обозначение t) определяемую формулой: $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,15$ К.

Термодинамическую температуру выражают в кельвинах, температуру Цельсия – в градусах. По размеру градус Цельсия равен кельвину. Градус Цельсия – это специальное наименование, используемое в данном случае вместо «кельвин».

Интервал или разность термодинамических температур выражают в кельвинах. Интервал или разность температур Цельсия допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия [7].

На сессии Международного Комитета мер и весов в 1968 г. Была принята Международная практическая температурная шкала (МПТШ-68), которая основывается на реперных точках. ГОСТ 8.157-75 предусматривает применение практических температурных шкал, установленных настоящим стандартом, образует единую систему температурных шкал, непрерывную от 0,01 до 100000 К. Практические температурные шкалы реализуются различными методами. Практические температурные шкалы установлены таким образом, что температуры, измеренные по ним, насколько возможно близки к термодинамическим температурам [8]. Реперными точками являются: тройная точка равновесного водорода (13,81 К, $-259,34$ °С); равновесие между жидкой и газообразной фазами равновесного водорода при давлении 33330,6 н/м² (17,042 К, $-256,108$ °С); точка кипения равновесного водорода (20,28 К, $-252,87$ °С); точка кипения неона (27,102 К, $-246,048$ °С); тройная точка кислорода (54,361 К, $-218,789$ °С); точка кипения кислорода (90,188 К, $-182,962$ °С); тройная точка воды (273,16 К, 0,01 °С); точка кипения воды (373,15 К, 100 °С); точка затвердевания цинка (692,73 К, 419,58 °С); точка затвердевания серебра (1235,08 К, 961,93 °С); точка затвердевания золота (1337,58 К, 1064,43 °С). Промежуточные точки МПТШ-68 воспроизводятся по интерполяционным формулам, устанавливающим связь между температурой и термометрическими свойствами приборов, эталонированных по этим точкам [9].

Так в интервале от 0 до +660 °С температуру t находят по сопротивлению платинного термометра сопротивления (ПТС): $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$, где R_0 , A и B – постоянные, которые определяются экспериментально в точках таяния льда, кипения воды и серы.

В интервале от -190° до 0 °С температуру t находят по сопротивлению ПТС согласно зависимости: $R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)]$, где C – постоянная, вычисляется по измерениям, произведенным в точке кипения кислорода.

В интервале температур от $+660^{\circ}$ до $+1063^{\circ}\text{C}$ температура определяется по ЭДС платинородий-платиновой термопары при нулевой температуре ее свободных концов. Интерполяционная формула имеет вид: $e_t = a + bt + ct^2$, где t – температура горячего спая термопары; a, b и c – определяются при нагреве до температур плавления сурьмы, серебра, золота.

1.2. Принцип действия термоэлектрических ИП. Материалы ИП

Термопара является одним из самых простых и широко используемых компонентов для измерения температуры. Термопары используются в стандартных промышленных методах экономически эффективного измерения температуры в широком диапазоне с приемлемой точностью. Они используются в разнообразных применениях вплоть до $+2500^{\circ}\text{C}$ в бойлерах, водонагревателях, печах и самолетных двигателях [10]. Принцип действия термоэлектрических преобразователей состоит в использовании термоэлектрического эффекта, возникающего в цепи термопары (ТП).

На рисунке 1 приведены термопара и способ ее подключения к измерительному прибору.

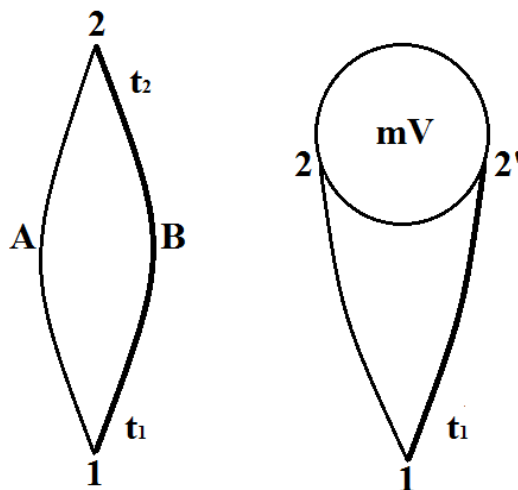


Рисунок 1 – Термопара и способ ее подключения

При разности температур между точками 1 и 2 соединения двух разнородных проводников А и В, образующих термопару, в цепи термопары воз-

никает термо-ЭДС. При постоянной температуре точки 2 термо-ЭДС термопары:

$$E_{\text{ТП}} = f(t_1) - f(t_2) = f(t_1) - C, \quad (1)$$

где C – константа.

Зависимость (1) используется для измерения температуры с помощью термоэлектрических преобразователей. Проводники из разнородных материалов (А и В), образующие ТП, называют термоэлектродами. Соединение термоэлектродов называют горячим (рабочим) спаем, а соединения термоэлектродов с измерительным прибором 2 и 2' называют холодными (свободными) концами термопары. Для того чтобы подключение третьего проводника (измерительного прибора) не изменяло термо-ЭДС ТП, необходимо, чтобы температура точек подключения 2 и 2' была одинаковой. Материалы, применяемые для изготовления ТП, должны отвечать требованиям высокой чувствительности при широком диапазоне частот, постоянства статической характеристики, обладать антикоррозийной способностью, хорошей электропроводностью, химической и термической стойкостью. Используемые материалы делятся на 3 группы: сплавы на основе благородных металлов, сплавы на основе благородных металлов, полупроводниковые материалы

Наиболее широко используются ТП из металлов первой группы. Эта группа ТП отличается относительно узким температурным диапазоном (до 1000...1100°C), но имеет повышенную чувствительность

При подборе материалов термоэлектродов пользуются данными термоэлектрического ряда. В нем термоэлектрические свойства различных материалов выражены по отношению к нормальному термоэлектроду, за который принимают химически чистую платину. Термоэлектроды из материала первой группы чаще всего изготавливаются из сплавов на основе меди, никеля, железа, хрома, алюминия. Сложный состав сплавов и трудность получения в химически чистом виде некоторых из перечисленных элементов затрудняют

изготовление идентичных термоэлектронных и приводят к погрешности отклонения характеристик ТП от градуировочной [2].

Для термопар применяются определенные обозначения и сокращения. Они приведены в таблице 1 [11].

Таблица 1 – Типы термопар

Обозначение типа термопары	Обозначение промышленного термопреобразователя
R	ТПП (Платина – 13 % родий/платина)
S	ТПП (Платина – 10 % родий/платина)
B	ТПР (Платина – 30 % родий/платина – 6 % родий)
J	ТЖК [Железо/медь – никель (железо/константан)]
T	ТМК [Медь/медь – никель (медь/константан)]
E	ТХКн [Никель – хром/медь – никель (хромель/константан)]
K	ТХА [Никель – хром/никель – алюминий (хромель/алюмель)]
N	ТНН [Никель – хром – кремний/никель – кремний (нихросил/нисил)]
A(A-1, A-2, A-3)	ТВР (Вольфрам – рений/вольфрам – рений)
L	ТХК (Хромель/копель)
M	ТМК (Медь/копель)

При измерении температур выше 1100 °С используется группа ТП из благородных металлов, в основном с применением платины. Такие ТП характеризуется высокой стабильностью свойств, расширенным температурным диапазоном (до 1800 °С), однако чувствительность их примерно на порядок ниже, чем у ТП из неблагородных металлов. Недостатком термопар из материалов второй группы является их высокая стоимость [2].

При изменении температур выше 2000 °С используются особо термостойкие материалы: вольфрам, молибден, рений, иридий, тантал. Современные ТП, изготовленные из этих материалов, позволяют производить кратковременные измерения температуры порядка 2500 °С.

Основной недостаток ТП из тугоплавких материалов – неидентичность характеристик за счет отклонения процентного состава сплавов, плохие механические свойства и высокая стоимость входящих в их состав элементов [2].

Диапазоны измерений и пределы допускаемых отклонений термодвижущей силы (ТЭДС) от номинальных статических характеристик (НСХ) преобразований в температурном эквиваленте для разных типов термопар приведены в таблице 2 [11].

Таблица 2 – Диапазоны измерений и пределы допускаемых отклонений

ТЭДС от НСХ

Обозначение промышленного термопреобразователя	Обозначение типа термопары	Диапазон измерений, °С	Пределы допускаемых отклонений ТЭДС от НСХ $\pm \Delta t$, °С
ТПШ	S, R	От 0 до 600 Св. 600 до 1600	1,5 $0,0025t$
		От 0 до 1100 Св. 1100 до 1600	1,0 $1,0+0,003(t-1100)$
ТПР	В	От 600 до 800 Св. 800 до 1800	4,0 $0,005t$
		От 600 до 1800	$0,0025t$
ТХК	L	От -200 до -100 Св. -100 до +100	$1,5+0,01 t $ 2,5
		От -40 до +360 Св. 360 до 800	2,5 $0,7+0,005t$

Продолжение таблицы 2

Обозначение промышленного термопреобразователя	Обозначение типа термопары	Диапазон измерений, °С	Пределы допускаемых отклонений ТЭДС от $НСХ \pm \Delta t, ^\circ C$
ТХК _Н	Е	От -200 до -167 Св. -167 до +40	0,015 <i>t</i> 2,5
		От -40 до +333 Св. 333 до 900	2,5 0,0075 <i>t</i>
ТХК _Н	Е	От -40 до +375 Св. 375 до 800	1,5 0,004 <i>t</i>
ТХА, ТНН	К, N	От -250 до -167 Св. -167 до +40	0,015 <i>t</i> 2,5
		От -40 до +333 Св. 333 до 1300	2,5 0,0075 <i>t</i>
		От -40 до +375 Св. 375 до 1300	1,5 0,004 <i>t</i>
ТМК	Т	От -200 до -66 Св. -66 до +40	0,015 <i>t</i> 1,0

Продолжение таблицы 2

Обозначение промышленного термопреобразователя	Обозначение типа термопары	Диапазон измерений, °С	Пределы допускаемых отклонений ТЭДС от НСХ $\pm \Delta t$, °С
ТМК	Т	От -40 до +135 Св. 135 до 400	1,0 0,0075 <i>t</i>
		От -40 до +125 Св. 125 до 350	0,5 0,004 <i>t</i>
ТЖК	J	От 0 до 333 Св. 333 до 900	2,5 0,0075 <i>t</i>
		От -40 до +375 Св. 375 до 750	1,5 0,004 <i>t</i>
ТМК	М	От -200 до 0 Св. 0 до 100	1,3+0,001 <i>t</i> \br/>1,0
ТВР	А-1, А-2, А-3	От 1000 до 2500	0,007 <i>t</i>
		От 1000 до 2500	0,005 <i>t</i>

Пределы допускаемых отклонений ТЭДС термопар рассчитывают по формуле: $\Delta E = \Delta t \frac{dE}{dt}$, где Δt – предел допускаемого отклонения ТЭДС тер-

мопары от НСХ преобразования, находится по таблице (2), °С; $\frac{dE}{dt}$ – чувствительность термопары, рассчитанная для измеренного значения температуры, мВ·°С⁻¹.

ТП с термоэлектродами из полупроводниковых материалов или с термоэлектродами, состоящими из пары «металл–неметалл» (кремний, теллур), отличаются повышенной чувствительностью, но практическое их применение ограничивается узким температурным диапазоном, разбросом параметров и низкой механической прочностью.

При измерении температур выше 3000 °С используются термоэлектрические ИП, использующие лучистую энергию нагретых тел.

Отметим, что термопара ТПП отличается повышенной стабильностью, считается образцовой и служит для воспроизведения международной температурной шкалы. Термопара ТПР имеет довольно широкий диапазон измеряемых температур. Термопара ТХК отличается высокой чувствительностью и может применяться при измерении низких температур. Термопара ТХА имеет практически линейную характеристику при достаточно высокой чувствительности в широком диапазоне температур. При выборе термопары для производства замеров температуры в некотором диапазоне следует выбирать ту термопару, коэффициент линейности которой изменяется менее других в рамках этого диапазона.

В ГОСТ Р. 8.585-2001 приведены вид и порядок полинома, а также коэффициенты полиномиальной аппроксимации зависимости выходного напряжения термопар от температуры, которые определяются по градуировочным таблицам для каждого типа термопар [12]. Например, для термопары типа R для диапазона температур от минус 50 °С до плюс 1064,18 °С, полином имеет вид:

$$E = \sum_i^9 A_i t^i, \quad (2)$$

где A_i – коэффициент полинома.

Коэффициенты выражения (2) соответственно равны: $A_0=0$, $A_1=5,28961729765 \cdot 10^{-3}$, $A_2=1,39166589782 \cdot 10^{-5}$, $A_3= -2,38855693017 \cdot 10^{-8}$, $A_4=3,56916001063 \cdot 10^{-11}$, $A_5= -4,62347666298 \cdot 10^{-14}$, $A_6= 5,00777441034 \cdot 10^{-17}$, $A_7= -3,73105886191 \cdot 10^{-20}$, $A_8=1,57716482367 \cdot 10^{-23}$, $A_9=2,81038625251 \cdot 10^{-27}$ [11].

1.3. Конструкция, градуировка термопар

Исходя из конструкции и назначения различают термопары погружаемые и поверхностные; в зависимости от условий эксплуатации (стационарные, переносные, разового применения, многократного применения, кратковременного применения); в зависимости от защищенности от воздействия окружающей среды (обыкновенные, водозащищенные, защищенные от агрессивных сред, взрывозащищенные, защищенные от других механических воздействий); в зависимости от герметичности к измеряемой среде (негерметичные, герметичные); в зависимости от инерционности (малой инерционности, средней инерционности, большой инерционности, ненормированной инерционности); в зависимости от устойчивости к механическим воздействиям (обыкновенные, виброустойчивые); в зависимости от числа термопар, для измерения температуры в одной зоне (одинарные, двойные, тройные); в зависимости от числа зон (однозонные, многозонные); в зависимости от наличия контакта термопары с металлической частью защитной арматуры (с открытой термопарой, с закрытой изолированной термопарой, с закрытой неизолированной термопарой) [12].

В зависимости от условий работы конструктивное оформление термоэлектрического измерительного преобразователя может различаться. На рисунке 2 приведен термоэлектрический преобразователь. Рабочим органом ТП является чувствительный элемент, состоящий из двух разнородных термоэлектродов 9, сваренных между собой на конце 11, который составляет горячий спай. Термоэлектроды изолированы по всей длине с помощью изолято-

ров 1 и помещены в защитную арматуру 10. Свободные концы элемента подключены к контактам термопреобразователя 7, расположенным в головке 4, которая закрывается крышкой 6, имеющей прокладку 5. Положительный термоэлектрод подключают к контакту со знаком «+». Герметизация вводов термоэлектродов 9 осуществляется с помощью эпоксидного компаунда 8.

Рабочий конец ТП изолируют от защитной арматуры керамическим наконечником, который в некоторых конструкциях для уменьшения тепловой инерционности, может отсутствовать.

Термопреобразователи могут иметь штуцер 2 для крепления по месту и штуцер 3 для ввода соединительных проводов.

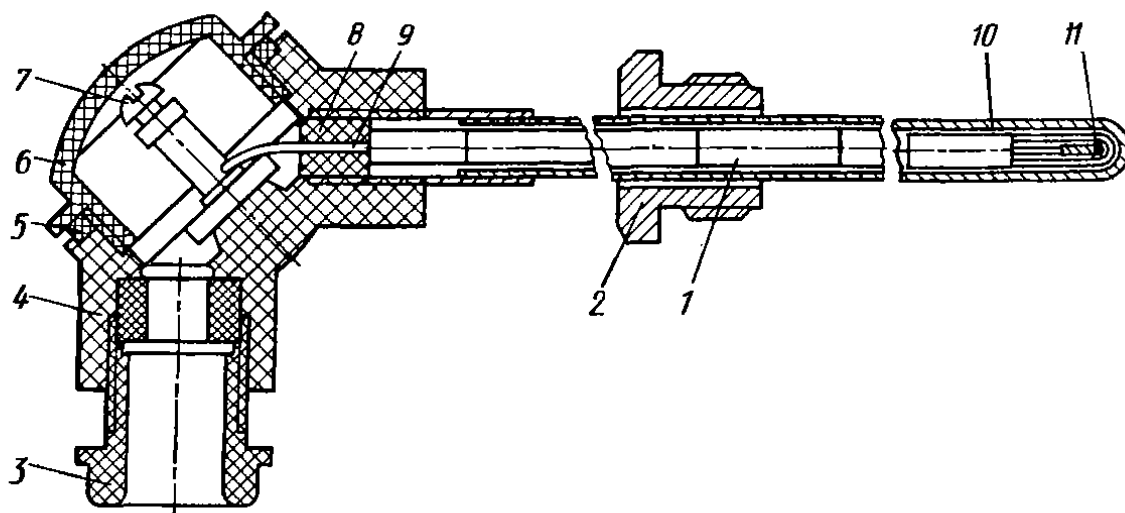


Рисунок 2 – Термоэлектрический преобразователь

Как отмечалось ранее, принцип действия термоэлектрического преобразователя основан на преобразовании тепловой энергии в термо-ЭДС элемента при наличии разности температур между его свободными концами и горячим спаем. Возникновение термо-ЭДС в ТП объясняется тем, что при его нагревании возникает поток электронов от горячего спае к холодному. На холодном спае создается отрицательный потенциал, а на горячем – положительный. Разность этих потенциалов будет определять величину термо-ЭДС термопреобразователя.

Если температуру холодного спая поддерживать постоянной, то термо-ЭДС будет зависеть только от степени нагрева рабочего конца преобразователя, что позволяет градуировать измерительный прибор в соответствующих единицах температуры. В случае отклонения температуры свободных концов от градуировочного значения, равного 0 °С, к показаниям вторичного прибора вводится соответствующая поправка.

Температуру свободных концов учитывают для того, что бы знать величину поправки. Величина вводимой поправки будет небольшой, и определенной, если температура свободных концов будет невысокой и постоянной. Поправку на температуру свободных концов в зависимости от условий вводят тремя способами: по градуировочной таблице; перестановкой стрелки выключенного прибора с нулевого положения до отметки, которая соответствует температуре свободных концов; автоматическими устройствами – при помощи компенсационных коробок или схем измерительных приборов [13].

«Градуировка термопары – это определение термо-ЭДС термопары от температуры рабочего конца при постоянном значении температуры рабочих концов» [13]. Исходя из назначения, градуировка ТП производится различным образом. Образцовые ТП, предназначенные для измерения температуры с высокой точностью, градуируется по реперным точкам, технические ТП, предназначенные для измерения температуры с ограниченной точностью, – с помощью образцовых термометров. В обоих случаях термо-ЭДС ИП измеряется с помощью потенциометра постоянного тока. Температура свободных концов ТП в процессе градуировки поддерживается постоянной и равной 0 °С. Интерполяция промежуточных точек характеристики $e(t)$ по данным градуировки производится согласно аналитическим зависимостям. Например, для термопары ТПП аналитическое выражение имеет вид: $e(t) = at + bt^2 + ct^3$ в диапазоне температур +100...+300 °С. Постоянные a , b , c определяются соответственно по термо-ЭДС ТП, замеренным при температурах кипения воды (100 °С), затвердевания олова (+231,85 °С) и кадмия (+320,9 °С).

При градуировке технических ТП используется метод сличения: измерение входной ЭДС производится через заданные интервалы температур (10, 50 или 100° С), которые отмечаются по показаниям образцового технического средства, ртутного термометра или образцовой ТП в зависимости от требуемой точности градуировки и условий применения. По данным ТП составляются градуировочные таблицы [6]. В ГОСТ Р. 8.585—2001 на термопары приведены градуировочные таблицы стандартных ТП [11].

1.4. Защита термопар от внешних воздействий

Для защиты термоэлектродов от механических повреждений и агрессивного действия среды, а так же удобства установки на технологическом оборудовании применяют защитную арматуру. Материал и исполнение арматуры могут быть различными в зависимости от назначения и области применения. Наиболее широко в качестве материалов металлической защитной арматуры используют высоколегированные стали и коррозионно-стойкие, жаропрочные и жаростойкие сплавы на основе железа, никеля, хрома и добавок алюминия, кремния, марганца. В настоящее время наибольшее распространение в качестве защитной арматуры высокотемпературных термопреобразователей получил молибден.

Медьсодержащие материалы применяют при измерении температур до 300 °С. При измерении температур до 600 °С для арматуры используют цельнотянутые трубы, для температур до 800 °С – легированную сталь, для температур до 1000 °С – окалиностойкую сталь. Для защиты термоэлектродов платиновой группы и тугоплавких металлов и сплавов применяют чехлы из огнеупорных материалов или кварца.

Трубки из кварцевого стекла (SiO_2) имеют очень высокую термическую устойчивость. Длительная эксплуатация платинородиевых термопар в защитной арматуре из кварцевого стекла нежелательна вследствие значительных изменений термо-ЭДС, хрупкости и разрушения из-за загрязнения крем-

нием. Поэтому кварцевые защитные оболочки применяют в высокотемпературных термопреобразователях кратковременного действия.

Основным материалом защитных чехлов термопар для измерения температуры различных сред в черной металлургии является корунд (окись алюминия Al_2O_3), из которого можно получить плотные, стойкие в расплавах и достаточно термостойкие изделия.

До $1300\text{ }^\circ\text{C}$ работоспособны фарфоровые чехлы, содержащие до 40% Al_2O_3 . Их применяют для длительного измерения температур до $1100 - 1200\text{ }^\circ\text{C}$ в доменных воздухонагревателях.

В качестве защитной арматуры термопреобразователей для измерения температуры жидкого чугуна, а также медных и алюминиевых расплавов наибольшее распространение получила графитооксидная композиция. Для изготовления наконечников используют следующий состав: графит природный $20 - 40\%$; шамот $20 - 30\%$, огнеупорная глина $40 - 50\%$; смола термоактивная $5 - 12\%$.

Важнейшей частью термоэлектрических преобразователей является огнеупорная электроизоляция, оказывающая существенное влияние на точность измерения температуры. Электроизоляторы кроме своей основной функции (электрической изоляции термоэлектродов друг от друга и от защитного чехла) выполняют роль элемента конструкции и несут значительные механические нагрузки, защищают термоэлектроды от воздействия окружающей среды, препятствуют проникновению вредных химических веществ, оказывающих разрушающее влияние.

Термоэлектроды термопар изолируют друг от друга и защитной арматуры с помощью одно- и двухканальных фарфоровых бус при измерении температуры до $1300\text{ }^\circ\text{C}$. При более высоких температурах электроизоляционные свойства фарфора ухудшаются и поэтому используют бусы или трубки из окисей алюминия, магния, иттрия и бериллия [13].

2. ПОГРЕШНОСТИ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕРМОПАР

2.1. Основные сведения о погрешностях термопар

Основным недостатком построения измерительного канала с использованием термопары является ее малое выходное напряжение (около 50 мкВ на градус), которое гораздо меньше помех, наведенных на элементах измерительной цепи в обычных условиях. Поэтому очень важно правильно выполнить экранирование и заземление проводов, идущих от термопары к модулю ввода. Модуль ввода желательно помещать по возможности ближе к термопаре, чтобы снизить длину проводов, по которым передается аналоговый сигнал.

Важным достоинством термопар является очень низкое внутреннее сопротивление, что делает их практически нечувствительными к емкостным наводкам.

Химический состав материала ТП влияет на точность измерений. Внешние факторы, а именно, давление, коррозия, радиация могут изменить кристаллическую структуру или химический состав материала, что приводит к росту погрешности измерений.

Погрешность изменения температуры холодного спая, погрешность нелинейности, динамическая погрешность относятся к инструментальным погрешностям и указываются в паспорте. Стоит отметить, также погрешность, которая возникает при постепенной деградацией характеристик (при высокой температуре), и погрешность, которая вызвана внешними помехами [14].

2.2. Статические погрешности термопар

Основными источниками статической погрешности ТП являются: погрешности за счет изменения температуры свободных концов; отклонения характеристик ТП $E(t)$ от градуировочной и ее нелинейность; временные из-

менения параметров ТП. Наиболее значимой является погрешность от изменения температуры свободных концов. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Как отмечалось ранее, при измерении температуры с помощью ТП температура ее свободных концов должна быть неизменной. При градуировке термопары свободные концы термостатируются при температуре $t_0 = 0^\circ\text{C}$, что достигается их погружением в тающий лед или в нуль-термостат. На практике поддержание температуры свободных концов $t_0 = 0^\circ\text{C}$ затруднено и обычно не выполняется. Температура свободных концов чаще всего соответствует комнатной температуре. В этом случае при неизменном значении измеряемой температуры t_x выходная ЭДС ТП изменяется, появляется погрешность Δt_x за счет изменения температуры свободных концов. Погрешность носит систематический характер. Если температура $t_0' > 0^\circ\text{C}$, выходная ЭДС ТП при положительной $t_x = \text{const}$ уменьшается и наоборот. Сказанное поясняется рисунком 3, на котором изображена градуировочная характеристика ТП.

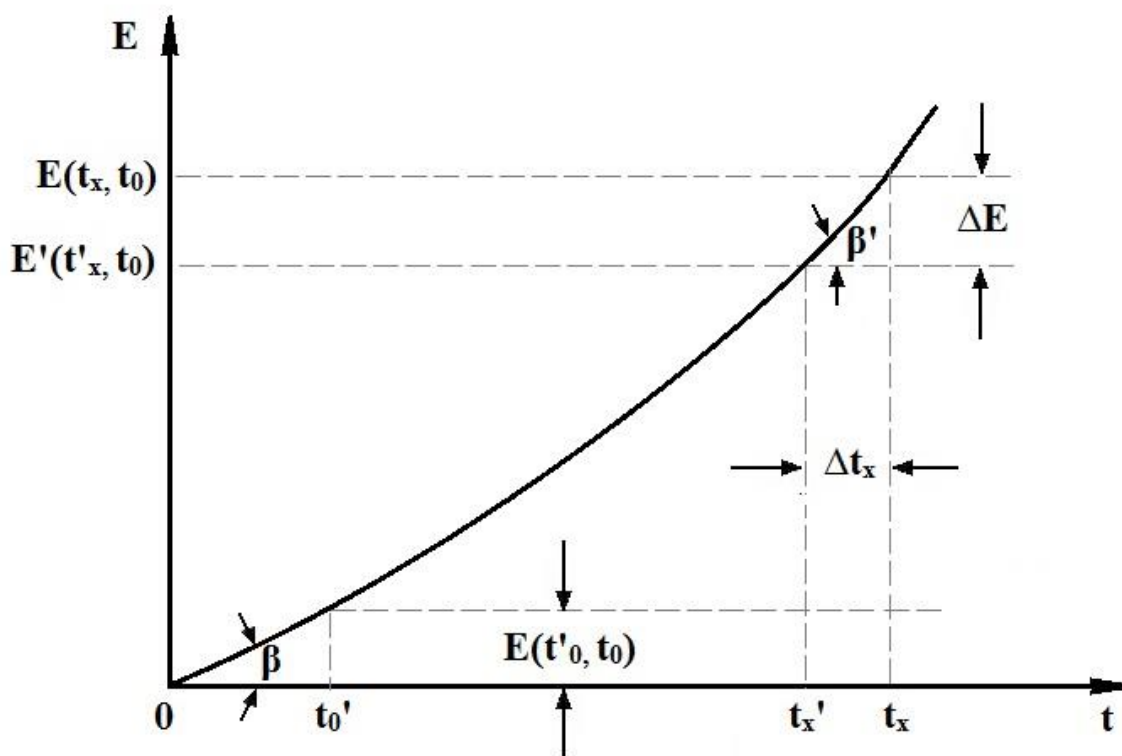


Рисунок 3 – Влияние температуры свободных концов ТП

На графике указаны значения термо-ЭДС E и E' полученные при измерениях неизвестной температуры $t_x = \text{const}$ в условиях, когда температура свободных концов ТП была $t_0 = 0^\circ\text{C}$ и $t'_0 > 0^\circ\text{C}$.

Погрешность в ЭДС термопары ΔE может быть определена путем следующих рассуждений. Записав выходные значения термо-ЭДС ТП E и E' : $E(t_x, t_0) = E(t_x) - E(t_0)$ и $E'(t'_x, t_0) = E(t'_x) - E(t_0)$ мы получаем выражения:

$$\Delta E = E(t'_0) - E(t_0) = E(t'_0, t_0) \quad (3)$$

Таким образом, в соответствии с выражением (3) мы можем сказать, что количественно погрешность ΔE равна той ЭДС, которую развивает данная ТП при условии, что ее горячий конец нагрет до температуры t'_0 , а свободные концы имеют температуру $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Учитывая это, можно вводить поправку в искаженное значение ЭДС E' и уточнять измеренное значение температуры. Для этого нужно знать температуру t'_0 и найти по градуировочной таблице для данной ТП значение, соответствующее ΔE согласно уравнению (3), которое добавляется к E' при условии, что t_x положительна и $t'_0 > 0^\circ\text{C}$. Поправку в показания термоэлектрического пирометра можно вводить непосредственно в температуру t'_x . Рассмотрев на графике (3) два треугольника с углами β и β' , можно написать $\Delta E = (t'_0 - t_0)\text{tg}(\beta') = (-t_x - t'_x)\text{tg}(\beta)$. Тогда поправка в температуру δ_t определится как:

$$\delta_t = (t'_0 - t)k, \quad (4)$$

где $k = \text{tg}(\beta')/\text{tg}(\beta)$

Очевидно, зная температуру свободных концов $t'_0 > 0^\circ\text{C}$ в момент измерения и отметив показания пирометра, можно ввести поправку в формуле (4) и вычислить уточненное значение $t_x = t'_x + \delta_t$. Коэффициент k в формуле не является постоянным. Для ориентировочного расчета поправки δ_t можно полагать, что значение $k = 0,8 - 1,0$ для ТП из неблагородных металлов и $k = 0,5$

– 0,6 для ТП платиновой группы. Рассчитанную поправку удобно вводить в показания вторичного прибора, сдвинув корректором его стрелку с нуля (при отключенной ТП) на величину δ_t . В дальнейшем прибор автоматически вводит поправку t_x при условии, что температура t'_0 более не изменяется. В современных термоэлектрических пирометрах используются схемные методы автоматического ввода поправки на температуру свободных концов.

Отклонение характеристики термоэлектрического преобразователя от градуировочной в основном вызывается примесями в материалах и их неоднородностью. Сплавы, образующие термоэлектроды термопары, часто имеют сложный химический состав (ТХА, ТХК и др.). Неточная дозировка веществ, образующих сплав, вызывает изменение свойств ТП и ее характеристики. Этому же способствует сложность получения в чистом виде некоторых веществ (железа, никеля), широко используемых при производстве термопар. Существует некоторая неоднородность материалов термоэлектродов, благодаря чему, при перепаде температур вдоль термоэлектрической цепи могут возникнуть паразитные термо-ЭДС. «Обнаружено, что неоднородность термоэлектрических проволок отечественного производства вызывает погрешность в отклонении характеристик для ТХА до 5°C , для ТХК до $2,5^\circ\text{C}$ в рабочем диапазоне измеряемых температур» [6]. Неидентичность характеристик ТП также вызывается механической обработкой термоэлектрических электродов за счет наклепа и механическими напряжениями в материале при нагреве и охлаждении.

Градуировочные характеристики термопар нелинейны. Погрешность отклонения от линейной характеристики $E(t)$ для различных ТП составляет 0,5 – 5% в зависимости от выбранного диапазона рабочих температур.

Погрешность за счет неправильного выбора и присоединения удлинительных проводов может быть значительной. Для облегчения правильного выбора удлинительных проводов к конкретному типу термопар их снабжают оплеткой определенного цвета. При подключении удлинительных проводов к ТП положительный термоэлектрод (в условном обозначении ТП он стоит

первым) соединяется с положительным проводом. Полярность подключения проводов указывается дополнительно на головке стандартных ТП.

При длительной эксплуатации ТП в материалах термоэлектродов, особенно в поверхностных слоях, происходят физико-химические процессы, приводящие к выгоранию материалов, изменению их химического состава, кристаллической и молекулярной структуры. В результате уменьшается количество свободных электронов в материале, снижается выходная ЭДС, изменяется внутреннее сопротивление ТП. Нестабильность термопары прогрессирует при длительной работе вблизи предельных для нее значений температуры. Стабилизации свойств термопары способствует предварительный отжиг термоэлектродов с последующим охлаждением на воздухе. Из числа соответствующих ТП наибольшей стабильностью свойств отличается ТП платиновой группы [6].

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОПАРАМИ

3.1. Общие соображения, схемы

Цель работы – ознакомление с термоэлектрическими преобразователями температуры (термопарами) и приборами, применяемыми в комплекте с термопарами.

Как было замечено ранее, термоэлектрические термометры представляют собой соединение термоэлектрического преобразователя (термопары) и того или иного средства соединения. В качестве средства соединения могут использоваться милливольтметры и компенсаторы постоянного тока [2].

На рисунке 4 представлена схема термоэлектрического термометра, на которой обозначено: ТП – термопара, УП – удлинительные провода, СП – соединительные провода, R_y – уравнивающий резистор, mV – милливольтметр.

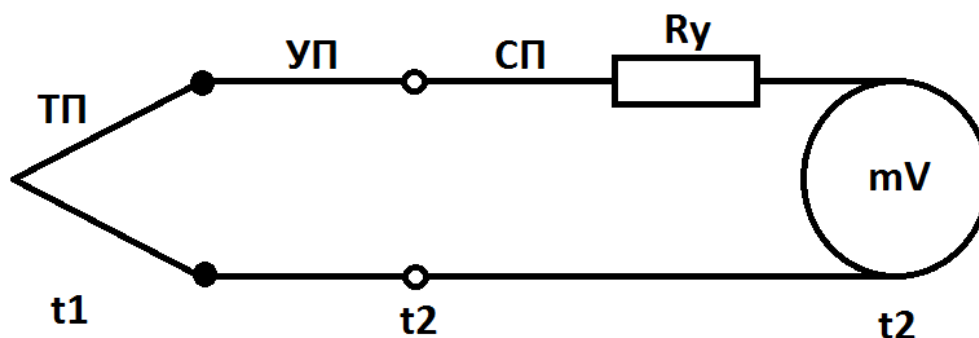


Рисунок 4 – Схема термоэлектрического термометра

Милливольтметр в данном случае называется пирометрическим. На рисунке 4 условно обозначена температура: t_1 – измеряемая температура, t_2 – температура свободных концов ТП. При этом показано, что переходить от удлинительных проводов (специальных) к обычным соединительным (более

дешевым) следует, когда температура уже практически не меняется при изменении расстояния от объекта до средства измерения.

Напряжение, измеряемое милливольтметром, $U = \frac{E_{ТП} R_{mV}}{R_{вн} + R_{mV}}$, где $E_{ТП}$ – ЭДС термопары, $R_{вн}$ – внешнее сопротивление, определяемое суммой сопротивлений термоэлектродов, уравнивающего резистора и проводов. Для поддержания постоянства $R_{вн}$ в схеме на рисунке 4 показан уравнивающий резистор, сопротивление которого дополняет $R_{вн}$ до указанного на милливольтметре значения (0,6; 5; 15; 25 Ом). Обычно пирометрические вольтметры имеют несколько зажимов с различными значениями $R_{вн}$.

Измерение температуры с помощью термопар сводится к измерению термо-ЭДС ТП и учету температуры ее свободных концов. ЭДС термопар часто измеряют потенциометрами, которые при полной компенсации не потребляют тока от измеряемого источника. Автоматические потенциометры всегда работают в равновесном режиме, т.е. практически ток в проводах, соединяющих потенциометр с источником ЭДС, отсутствует. Поэтому сопротивление проводов не вносит погрешность в показания потенциометра [16].

Схема автоматического потенциометра для измерения термо-ЭДС термопары приведена на рисунке 5, где R1, R2, R3, R4, R5 – резисторы, образующие неравновесный мост, на выходе которого создается компенсирующее напряжение U_k ; ИПС – источник питания стабилизированный; У – усилитель разности $\Delta U = E_x - U_k$; М – электродвигатель реверсивный; ТП – термопара; АП – автоматический потенциометр.

Для компенсации влияния температуры свободных концов термопары служит терморезистор R2, который располагается вблизи свободных концов термопары и имеет одинаковую с ними температуру t_0 . При увеличении температуры свободных концов t_0 термо-ЭДС ТП E_x уменьшается, но одновременно увеличивается сопротивление R2, что приводит к уменьшению компенсирующего U_k , снимаемого с выходной диагонали моста.

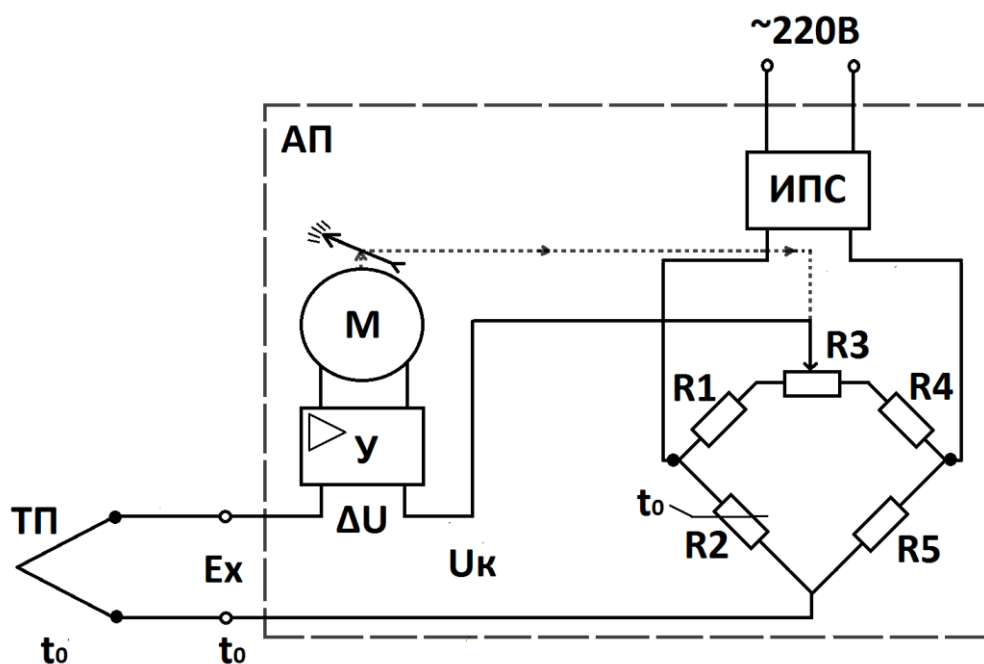


Рисунок 5 – Схема автоматического потенциометра

При соответствующем выборе сопротивления R_2 изменение t_0 не ведет к появлению погрешности.

В милливольтметрах, работающих в комплекте с ТП, при постоянстве t_0 вводят поправку на отклонение температуры свободных концов ТП от $0\text{ }^\circ\text{C}$, передвигая стрелку прибора корректором на отметку, соответствующую температуре свободных концов ТП (при отключенной от милливольтметра термопаре)

Если термо-ЭДС ТП E_x измеряется лабораторным потенциометром и известна температура свободных концов ТП t_0 , то найдя термо-ЭДС E_0 , соответствующую температуре t_0 , по градуировочной таблице, вводят поправку следующим образом: $E_x' = E_x + E_0$, где E_x' – термо-ЭДС с учетом поправки на отклонение температуры свободных концов от $0\text{ }^\circ\text{C}$. По значению E_x' определяют измеряемую температуру по той же таблице.

Для исследования термопар используется электрическая печь (ЭП), которая, в зависимости от пропускаемого тока, может быть нагрета до температуры $400 - 600\text{ }^\circ\text{C}$. ЭП изображена на рисунке 6.

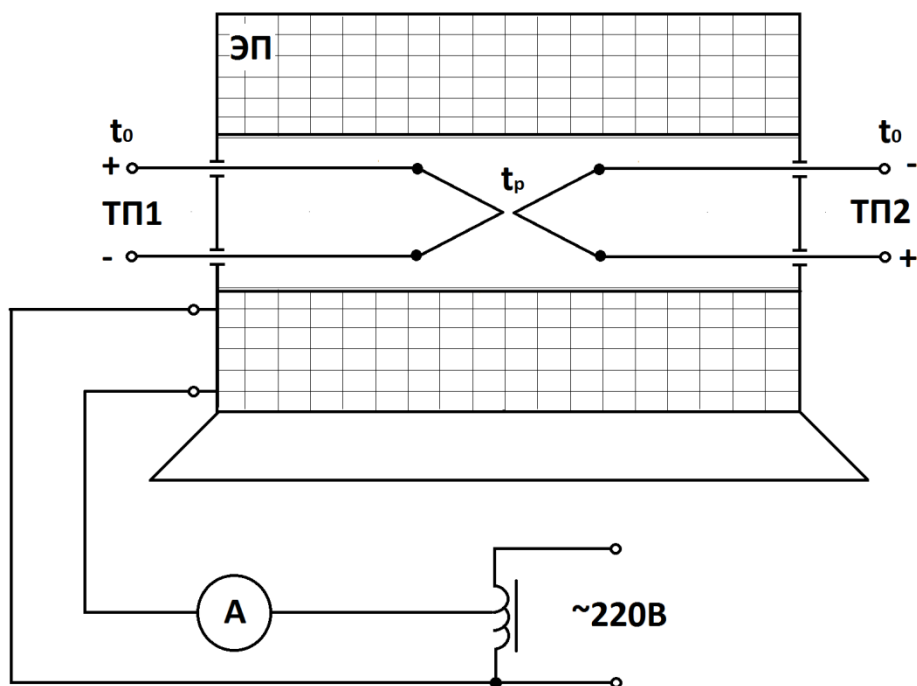


Рисунок 6 – Электрическая печь для исследования термопар.

В печь помещено несколько термопар, имеющие стандартные градуировки. Работаящие концы всех ТП имеют одну и ту же температуру t_p . Свободные концы находятся при комнатной температуре t_0 .

3.2. Поверка пирометрического милливольтметра

Для поверки пирометрического милливольтметра ПМВ используется переносной потенциометр ПП-63, в корпус которого встроен источник регулируемого напряжения (ИРН). В этом источнике имеется переключатель резисторов ($R = 0.6; 1.6; 5; 16,2; 25 \text{ Ом}$), включаемых последовательно с источником. На рисунке 7 изображен пирометрический милливольтметр ПП-63, под номером 1 – рукоятка установки рабочего тока; 2 – рукоятка ИРН; 3 – переключатель нагрузки; 4 – переключатель рода работ; 5 – переключатель диапазонов; 6 – реохорд; 7 – секционный переключатель; 8 – гальванометр [17]. Установив корректором стрелку ПМВ на нулевую отметку, милливольтметр подключают к ИРН; переключателем резисторов устанавливают требу-

емое для ПМВ сопротивление внешней цепи(переключатель 3), которое указывается на шкале или возле зажимов милливольтметра.

Плавно увеличивая выходное напряжение ИРН, устанавливают стрелку милливольтметра на проверяемую отметку шкалы t'_x подводя ее слева. Напряжение на выходе ИРН измеряют потенциометром. Шкала ПМВ градуирована в градусах температуры, а значение поданного на ПМВ напряжения измеряется в милливольтгах.

Для определения погрешности ПМВ показания потенциометра в милливольтгах переводятся в градусы по таблице градуировки термопары, для которой отградуирован милливольтметр. Поверку производят для возрастающих, а затем при убывающих показаниях прибора для шести отметок шкалы. Результаты поверки заносят в таблицу 3.

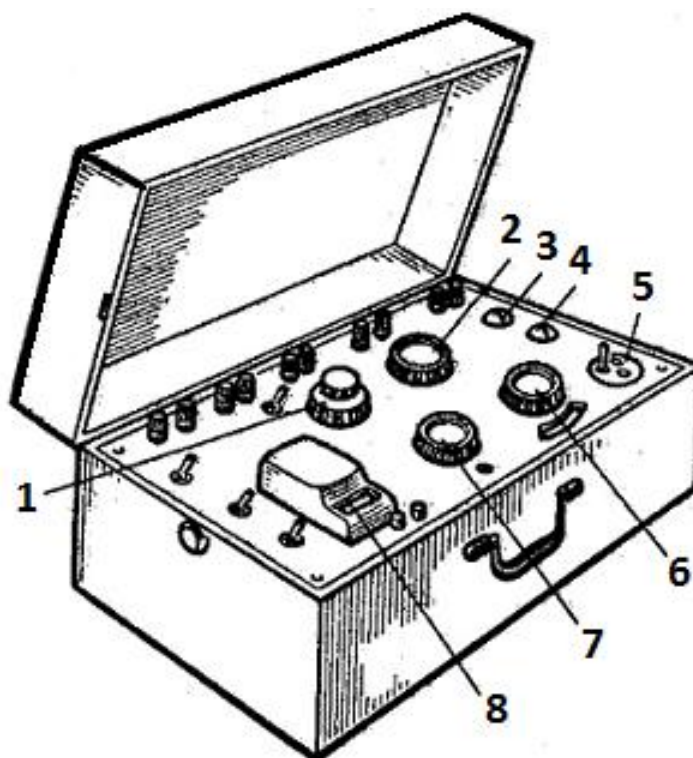


Рисунок 7 – потенциометр типа ПП-63

Для определения абсолютной погрешности, из поверяемой отметки шкалы вычитают действительное значение: $\Delta t = t'_x - t_x$, где t'_x – поверяемая величина; t_x – действительное значение величины. Приведенная погрешность

– это отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению температуры: $\gamma = \frac{\Delta t}{t_x} \cdot 100\%$

Таблица 3 – результаты поверки пирометрического милливольтметра

Поверяемая отметка шкалы $t'_x, ^\circ\text{C}$	Показания потенциометра $E_x, \text{ мВ}$		Действительное значение температуры $t_x, ^\circ\text{C}$		Абсолютная погрешность $\Delta t, ^\circ\text{C}$		Приведенная погрешность $\gamma, \%$	
	При увеличении	При уменьшении	При увеличении	При уменьшении	При увеличении	При уменьшении	При увеличении	При уменьшении

3.3. Измерение температуры термопарой в комплекте с милливольтметром и термопарой в комплекте с автоматическим потенциометром

При измерении температуры комплектом термопара – пирометрический милливольтметр необходимо предварительно в показания ПМВ ввести поправку на температуру свободных концов ТП. Для этого, не подключая термопару, устанавливают с помощью корректора стрелку прибора на отметку шкалы, соответствующую температуре свободных концов ТП (в данном случае – комнатной).

Для измерения температуры объекта к милливольтметру подключают термопару и последовательно с ней магазин, имитирующий соединительные провода и уравнильный резистор. На магазине устанавливают сопротивление, равное $R_{\text{вн}}$. Значение $R_{\text{вн}}$ указывается на шкале милливольтметра. После этого записывают показания милливольтметра и одновременно автоматического потенциометра, которые измеряют одну и ту же температуру t_p .

Предельная погрешность измерения температуры комплектом $\Delta t_x = \Delta t'_x + \Delta t''_x$, где $\Delta t'_x$ – предельная погрешность термопары, обусловленная отклонением реальной градуировочной характеристики термопары от расчетной; $\Delta t''_x$ – предельная погрешность прибора (ПМВ или автоматического потенциометра), определяется измеряемой температурой. $\Delta t'_x$ – определяется градуировкой и измеряемой температурой термопары. Согласно ГОСТ 3044-84 для термопары ХА пределы допускаемых отклонений $\Delta t'_x = \pm 1,5$ °С в диапазоне от –40 до 375 °С, а при температуре свыше 375°С $\Delta t = \pm 0.004 \cdot t_p$ °С, для термопары ХК пределы допускаемых отклонений $\Delta t'_x = \pm 2,5$ °С в диапазоне от –40 до 300 °С, а при температуре свыше 300 °С $\Delta t'_x = \pm 0.07 + 0.005 \cdot |t_p|$ °С. В приведенных формулах t_p – температура рабочего конца.

3.4. Исследование влияния сопротивления соединительных проводов на автоматический потенциометр и милливольтметр

Эти исследования проводятся при установившейся температуре в печи. Для этого в цепь исследуемого прибора последовательно с ТП включают магазин, сопротивление которого меняют от 0 до 50 Ом через 10 Ом. При этом записывают показания обоих приборов, что бы убедиться, что температура печи неизменна.

На рисунке 8 представлена схема термоэлектрического термометра, на которой обозначено: ТП – термопара, УП – удлинительные провода, СП – соединительные провода, R – резистор (магазин сопротивлений), mV – милливольтметр, АП – автоматический потенциометр.

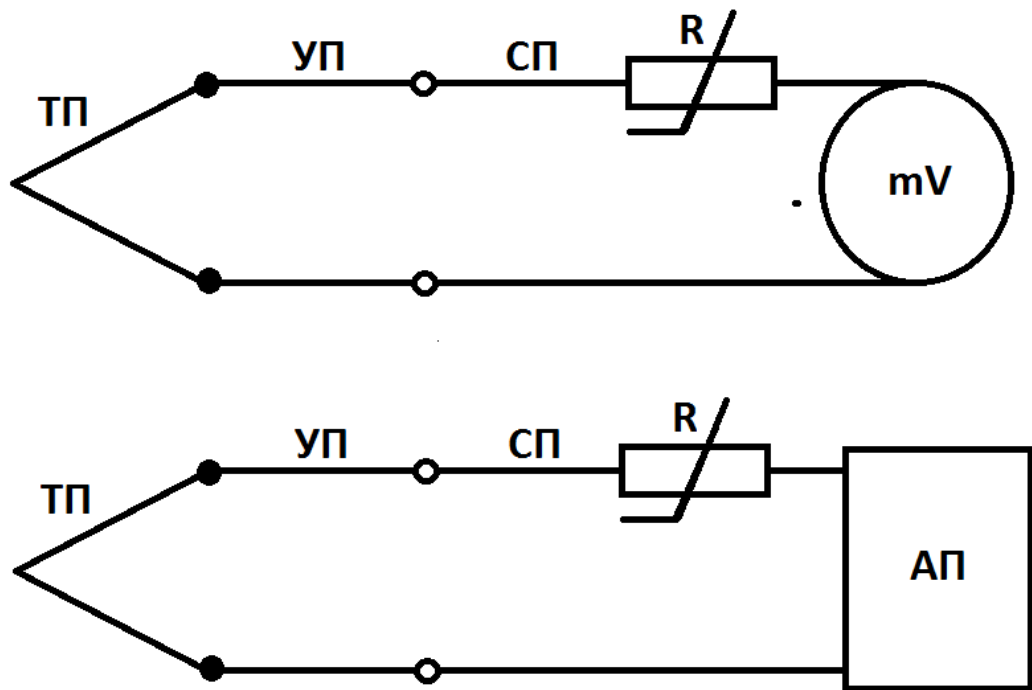


Рисунок 8 – Термопара в комплекте с милливольтметром и автоматическим потенциометром

3.5. Задание для самостоятельного выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой для исследования термопар. Собрать схему питания печи (рис. 6), включить питающее напряжение, установить ток в нагревателе по заданию руководителя.
2. Ознакомиться с принципом действия, устройством и схемой автоматического потенциометра (рис.5), записать его технические данные, обратив внимание на обозначение его градуировки, указанной на шкале. К входным зажимам автоматического потенциометра подключить термопару требуемой градуировки.
3. Произвести поверку пирометрического милливольтметра на шести отметках шкалы, градуированной в градусах, с помощью по-

тенциометра ПП-63, предварительно изучив инструкцию по применению потенциометра.

4. Подготовить пирометрический милливольтметр к работе с термопарой, введя корректором поправку на температуру свободных концов термопар. Подключить к зажимам милливольтметра термопару соответствующей градуировки, обеспечив необходимое сопротивление внешней цепи прибора.
5. Измерить установившуюся в печи температуру одновременно комплектом с автоматическим потенциометром и в комплекте с милливольтметром.
6. Оценить предельные погрешности измерения температуры комплектом с милливольтметром и комплектом с автоматическим потенциометром.
7. Определить влияние изменения сопротивления соединительных проводов в пределах 0 – 50 Ом на показания автоматического милливольтметра.

3.6. Тест по теме «Термопары»

Выберете единственный правильный и наиболее полный вариант ответа

1. Принцип действия термопары основан на эффекте...?
 - а) Зеебека
 - б) Керра
 - в) Пельтье
2. Из каких проводников состоит термопара?
 - а) Однородных
 - б) Разнородных
 - в) Однородных, но разной длины
3. Каким требованиям должна удовлетворять термопара?

- а) Малая чувствительность при широком диапазоне частот
 - б) Высокая чувствительность при узком диапазоне частот
 - в) *Высокая чувствительность при широком диапазоне частот*
4. Выберите обозначение для ТП хромель/константан.
- а) ТХКа
 - б) *ТХКн*
 - в) ТХК
5. Чем объясняется возникновение термо-ЭДС термопары?
- а) *При нагревании возникает поток электронов от горячего спая к холодному. На холодном спае создается отрицательный потенциал, а на горячем – положительный*
 - б) При нагревании возникает поток электронов от холодного спая к горячему. На холодном спае создается отрицательный потенциал, а на горячем – положительный.
 - в) При нагревании возникает поток электронов от горячего спая к холодному. На горячем спае создается отрицательный потенциал, а на холодном – положительный.
6. Основной недостаток термопары?
- а) *Малое выходное напряжение*
 - б) Дороговизна термопары
 - в) Высокое внутреннее сопротивление
7. Главное достоинство термопары
- а) Высокое выходное напряжение
 - б) Дешевизна термопары
 - в) *Низкое внутреннее сопротивление*
8. Основной источник статической погрешности термопары?
- а) *Нелинейность температурной зависимости*
 - б) Низкое внутреннее сопротивление
 - в) Линейность температурной погрешности
9. Для чего нужны удлинительные провода в ТП?

а) Для обеспечения большего перепада температур между горячим и свободным концами ТП и удобства поддержания температуры свободных концов постоянной

б) Для обеспечения меньшего перепада температур между горячим и свободным концами ТП

в) Для удобства поддержания нужной температуры свободных концов

10. Используемые материалы для ТП.

а) Полупроводниковые материалы

б) Сплавы на основе неблагородных и благородных металлов

в) Все вышеперечисленное

4. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В рамках данного дипломного проекта разрабатывается лабораторная работа, которая выполняется на лабораторном стенде. Целью разработки данного раздела является поиск решений, направленных на обеспечение безопасной деятельности человека при работе с установкой, используемой в рамках данной квалификационной работы. Основой для достижения цели является решение задачи на базе требований нормативно-технической документации. В данном разделе мы рассмотрим два важных вопроса: требования безопасности к условиям проведения лабораторных работ и требования безопасности к электротехническим изделиям, а так же рассмотрим классификацию опасных и вредных факторов.

4.1. Классификация опасных и вредных производственных факторов, обладающих свойствами физического воздействия на организм человека

Все производственные факторы по сфере своего происхождения подразделяют на следующие две основные группы:

- а) факторы производственной среды;
- б) факторы трудового процесса.

Из всего объема производственных факторов для целей безопасности труда по критерию возможности причинения вреда организму работающего человека выделяют:

- а) неблагоприятные производственные факторы;
- б) производственные факторы, не являющиеся неблагоприятными, то есть нейтрального или благоприятного действия.

Факторы, не являющиеся неблагоприятными, для цепей безопасности труда не выделяют. не фиксируют и не именуют.

Неблагоприятные производственные факторы по результирующему воздействию на организм работающего человека подразделяют:

- 1) на вредные производственные факторы, то есть факторы, приводящие к заболеванию, в том числе усугубляющие уже имеющиеся заболевания:
- 2) опасные производственные факторы, то есть факторы, приводящие к травме, в том числе смертельной.

Один и тот же неблагоприятный производственный фактор при различных характеристиках воздействия может оказаться или вредным, или опасным, а потому логическая граница между ними условна.

«Определение «опасные и вредные производственные факторы» описывает всю совокупность неблагоприятных производственных факторов и подчеркивает большую значимость «опасных» факторов, могущих привести к внезапной смерти, по сравнению с «вредными» факторами. Это устоявшееся определение» [19].

«Определение «вредные и опасные производственные факторы» описывает всю совокупность неблагоприятных производственных факторов. Он подчеркивает не только различие между «вредными» или «опасными» факторами, но и возможность перехода «вредных» факторов в «опасные». Рассмотрим некоторые из них» [19].

Опасные и вредные производственные факторы, которые связаны с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает человек, включая действие молнии и высоковольтного разряда в виде дуги, а также электрического разряда живых организмов.

Опасные и вредные производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой или низкой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги (обморожения) тканей организма человека;

Опасные и вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями, неионизирующими ткани тела человека:

а) постоянного характера, связанного с:

- 1) повышенным образованием электростатических зарядов:

- 2) наличием электростатического поля, чрезмерно отличающегося от поля Земли;
 - 3) наличием постоянного магнитного поля, чрезмерно отличающегося от геомагнитного поля Земли;
- б) переменного характера, связанного с наличием электромагнитных полей промышленных частот (порядка 50–60 Гц) [19].

4.2. Классификация опасных и вредных производственных факторов, обладающих свойствами психофизиологического воздействия на организм человека

Вредные и опасные производственные факторы, которые обладают свойствами психофизиологического воздействия на организм человека, подразделяют:

- а) на физические перегрузки, связанные с тяжестью трудового процесса;
- б) нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса.

Физические перегрузки подразделяют на:

- а) статические (связаны с рабочей позой);
- б) динамические нагрузки (связаны с массой поднимаемого и перемещаемого вручную груза);
- в) динамические нагрузки (связаны с повторением стереотипных рабочих движений).

Физические перегрузки организма человека, связанные с тяжестью трудового процесса, в целях оценки условий труда, разработки и принятия мероприятий по их улучшению характеризуются следующими показателями:

- а) физическая динамическая нагрузка;
- б) масса поднимаемого и перемещаемого груза вручную;
- в) стереотипные рабочие движения;

- г) статическая нагрузка;
- д) рабочая поза;
- е) наклоны корпуса тела работника;
- ж) перемещение в пространстве.

Нервно-психические перегрузки подразделяют:

- а) на умственное перенапряжение, в том числе вызванное информационной нагрузкой;
- б) перенапряжение анализаторов, в том числе вызванное информационной нагрузкой;
- в) монотонность труда;
- г) эмоциональные перегрузки.

Нервно-психические перегрузки организма работающего, связанные с напряженностью трудового процесса, в целях оценки условий труда, разработки и принятия мероприятий по их улучшению характеризуются такими показателями, как:

- а) длительность сосредоточенного наблюдения;
- б) активное наблюдение за ходом производственного процесса;
- в) число производственных объектов одновременного наблюдения;
- г) плотность сигналов (световых, звуковых) и сообщений в единицу времени;
- д) нагрузка на слуховой анализатор;
- е) нагрузка на голосовой аппарат;
- ж) работа с оптическими приборами [19].

4.3. Общие требования безопасности к условиям проведения учебных лабораторных работ

Лабораторные стенды в лаборатории являются действующими электроустановками, отдельные элементы которых находятся под напряжением, поэтому студенты в лаборатории должны соблюдать исключительную осто-

рожность и правила техники безопасности. Студент, находясь в лаборатории, должен быть предельно дисциплинированным и внимательным; выполнять все указания преподавателя, находиться непосредственно у рабочего стенда.

Согласно ГОСТ 12.4.113-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Работы учебные лабораторные. Общие требования безопасности» площадь помещений учебной лаборатории на одного студента должна быть не менее 4,5 м². Эстетическое оформление лаборатории должно способствовать снижению утомляющего воздействия учебного процесса. Помещение лаборатории должно быть оборудовано автоматическими сигнализациями, которые извещают в случае пожара. Помещение должно быть оборудовано сигнализаторами аварийной обстановки на лабораторном оборудовании и аппаратуре. Элементы и конструкция лабораторного оборудования и аппаратуры, которые могут быть источником опасности, должны быть обозначены сигнальными цветами, а в опасных зонах помещения лаборатории установлены знаки безопасности. В помещении учебной лаборатории должны быть средства оказания первой медицинской помощи (шины, аптечка, средства дезинфекции и др.) и нейтрализации особо опасных химических веществ с постоянно обновляемыми в установленные сроки медикаментами.

Преподаватели, проводящий лабораторные работы, и учебно-вспомогательный персонал, обслуживающий оборудование в лабораториях, должны проходить обучение, инструктаж и проверку знаний правил безопасного выполнения лабораторных работ. Студенты допускаются к выполнению лабораторных работ только после прохождения инструктажа по безопасности труда и пожарной безопасности в лаборатории в целом и на каждом рабочем месте. В учебной лаборатории должны быть утвержденные инструкции по технике безопасности и пожарной безопасности, а также журналы инструктажа [20].

4.4. Общие требования безопасности к электротехническим изделиям

Так как в данной лабораторной работе используется термопара и другие электрические устройства, то особое внимание стоит уделить электробезопасности.

Высокое напряжения сети электропитания – это один из значимых опасных факторов и имеется практически в любой разработке электротехнического, электронного и радиоэлектронного устройств или при выполнении большинства видов работ, связанных с эксплуатацией вновь разрабатываемого или готового (покупного) устройства, а также при его настройке или ремонте. Устройство должно быть безопасным при ремонте и эксплуатации, т. е. в любых эксплуатационных ситуациях должна быть исключена возможность поражения обслуживающего персонала и посторонних лиц электрическим током, травмирования электрической дугой.

Требования безопасности термопары должны соответствовать ГОСТ 12.2.007.0-75 «Изделия электротехнические. Общие требования безопасности». В конструкции электротехнических изделий должны быть предусмотрены средства шумо- и виброзащиты, обеспечивающие уровни шума и вибрации на рабочих местах в соответствии с утвержденными санитарными нормами. Допустимые значения шумовых и вибрационных характеристик электротехнических изделий должны быть установлены в стандартах и технических условиях на изделия конкретных видов и не должны превышать значений, указанных в СанПиН 2.2.4.3359-16. Изделия, которые создают электромагнитные поля, должны иметь защитные элементы (экраны, поглотители и т.п.) для ограничения воздействия этих полей в рабочей зоне до допустимых уровней. Требования к этим защитным элементам должны быть указаны в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий. Допускается для ограничения воздействия электромагнитного поля использовать защитные элементы, не входящие в состав изделия.

Изделия, которые являются источником теплового, оптического, рентгеновского излучения, а также ультразвука, должны быть оборудованы средствами для ограничения интенсивности этих излучений и ультразвука до допустимых значений. Требования к средствам, которые ограничивают интенсивность излучений и ультразвука, и допустимая температура нагрева поверхности внешней оболочки изделия, должны указываться в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий. Допускается для ограничения воздействия излучений использовать защитные элементы, не входящие в состав изделия.

Требования о наличии в конструкции изделия элементов, предназначенных для защиты от случайного прикосновения к движущимся, токоведущим, нагревающимся частям изделия, и элементов для защиты от опасных и вредных материалов конструкции и веществ, выделяющихся при эксплуатации, а также требования к этим защитным элементам, должны указываться в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий.

Электрическая схема изделия должна исключать возможность его самопроизвольного включения и отключения. Расположение и соединение частей изделия должны быть выполнены с учетом удобства и безопасности наблюдения за изделием при выполнении сборочных работ, проведении осмотра, испытаний и обслуживания. При необходимости изделия должны быть оборудованы смотровыми окнами, люками и средствами местного освещения. Требования к смотровым окнам, люкам и средствам местного освещения должны указываться в стандартах и технических условиях на конкретные виды изделий.

Конструкция изделия должна исключать возможность неправильного присоединения его сочленяемых токоведущих частей при монтаже изделий у потребителя. Конструкция штепсельных розеток и вилок для напряжений выше 42 В должна отличаться от конструкции розеток и вилок для напряжений 42 В и менее.

«При необходимости изделия должны быть оборудованы сигнализацией, надписями и табличками. Для осуществления соединения при помощи розетки вилки к розетке должен подключаться источник энергии, а к вилке – ее приемник. Предупредительные сигналы, надписи и таблички должны применяться для указания на: включенное состояние изделия, наличие напряжения, пробой изоляции, режим работы изделия, запрет доступа внутрь изделия без принятия соответствующих мер, повышение температуры отдельных частей изделия выше допустимых значений, действие аппаратов защиты и т.п. Знаки, используемые при выполнении предупредительных табличек и сигнализации, должны выполняться по ГОСТ 12.4.024-74 и размещаться на изделиях в местах, удобных для обзора» [21].

Пожарная безопасность изделия и его элементов должна обеспечиваться и в нормальном, и в аварийном режимах работы (короткое замыкание, перегрузка, плохой контакт и др.); ограничением массы горючих материалов, а также заменой на более стойкие к нагреву по ГОСТ 8865-93; ограничением проникновения горючих материалов (веществ) извне к пожароопасным узлам электротехнических изделий; применением конструкции изделий, которые обеспечивают предотвращение выброса раскаленных и (или) горящих частиц; введением в конструкцию изделий и в установки, в которых используются изделия, средств и элементов электротехнической защиты, снижающих вероятность возникновения пожара, в соответствии с нормативами, установленными ГОСТ 12.1.004-91; преимущественным применением изделий с меньшим количеством на полюс последовательных контактных точек, способных стать местом образования плохого контакта; доведением величины переходных сопротивлений в контактных соединениях до уровня, установленного стандартами на конкретные изделия; исключением применения изделий, способных выделять токсичные продукты горения в количествах, представляющих опасность для жизни и здоровья людей; ограничением температуры возможных источников зажигания и выбором режима работы электротехнических изделий, обеспечивающих условия пожаро- и взрывобез-

опасности веществ и материалов в соответствии с ГОСТ 12.1.044-89; применением средств и (или) элементов, предназначенных для автоматического отключения изделия в аварийном режиме работы (перегрузка, перегрев, короткое замыкание и др.) и исключающих возгорание частей изделий, выполненных из электроизоляционных материалов [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана лабораторная работа по дисциплине «Измерительные преобразователи» для студентов 4 курса направления «Приборостроение».

Актуальность данной работы обусловлена тем, что роль и объем температурных измерений в современной технике чрезвычайно значительны, поэтому и весьма велико разнообразие самих задач температурных измерений. Одним из самых распространенных средств измерения температуры является термопара. Это связано с простотой изготовления, удобством измерения и широким диапазоном рабочих температур.

В данной выпускной квалифицированной работе проведен обзор принципов действия термоэлектрических измерительных преобразователей, рассмотрены материалы, применяемые для изготовления термопар, их конструкция, градуировка и защита. Описаны погрешности и пути повышения надежности термопар. Кроме того, составлены тесты для студентов, выполняющих лабораторную работу.

При изучении термоэлектрических преобразователей в лабораторной работе измеряется температура термопарой в комплекте с милливольтметром и термопарой в комплекте с автоматическим потенциометром. Проводится поверка пирометрического вольтметра с помощью переносного потенциометра. Немаловажным при изучении термопары является исследование влияния сопротивления соединительных проводов на автоматический потенциометр и милливольтметр.

В дальнейшем данная лабораторная работа может быть использована в учебном процессе на кафедре информационно – измерительных систем и технологий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метрология, стандартизация и сертификация. Б. Я. Авдеев, В. В. Алексеев, Е. М. Антонюк и др. Учебник для вузов М.: ИЦ «Академия», 2007
2. Аббакумов К. Е., Антонюк Е. М., Филатов Ю. В. Измерительные преобразователи. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2008.
3. Методы измерения температуры. Часть 1. Методы и средства контактного измерения температуры: методические указания к практической работе / Сост. Т. Н. Немова, Н. А. Цветков. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. – 38 с. [Электронный ресурс]. URL http://portal.tsuab.ru/Met_2012_2/43.pdf (дата обращения: 05.02.2017).
4. Термопара, принцип действия, устройство [Электронный ресурс]. URL: <http://fb.ru/article/155520/termopara-printsip-deystviya-ustroystvo> (дата обращения: 20.02.2017).
5. Олейник Б. М. Приборы и методы температурных измерений. М.: Издательство стандартов, 1987. - 293 с
6. Е. А. Старосельцева Измерительные преобразователи неэлектрических величин: Конспект лекций Часть 2 Измерительные преобразователи тепловых и химических величин Л.: издательство ЛЭТИ, 1975
7. ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Единицы величин. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200031406> (дата обращения: 24.02.2017)
8. ГОСТ 8.157-75 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Шкалы температурные практические. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200014045> (дата обращения: 24.02.2017)
9. Международная практическая температурная шкала (МПТШ-68) . [Электронный ресурс]. URL: <http://sainfo.ru/units/info.php?t=153335> (дата обращения: 24.02.2017)

10. Мэтью Дафф, Джозеф Тови (США), перевод Андрея Данилова Два способа измерения температуры при помощи термопар [Электронный ресурс]. URL: <https://www.soel.ru/upload/clouds/1/iblock/540/54007c65d443f7db4fc70ea6b3308e3b/20110132.pdf> (дата обращения: 01.03.2017)
11. ГОСТ Р. 8.585—2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.norm-load.ru/SNiP/Data1/40/40742/> (дата обращения: 02.03.2017)
12. Сборник статей. Термопары. [Электронный ресурс]. URL: <http://d.17-71.com/2009/04/14/termoparyi-tipyi-i-obschee-opisaniesposobyi-podklyucheniya/> (дата обращения: 02.03.2017)
13. Ю. Е Крамарухин Приборы для измерения температуры.-М.: Машиностроение, 1990- 208с [Электронный ресурс]. URL: <http://techlib.org/books/kramaruhin-pribory-dlya-izmereniya-temperatury/#more-1937> (дата обращения: 21.03.2017)
14. Термопары [Электронный ресурс]. URL: http://www.bookasutp.ru/Chapter6_3_3.aspx (дата обращения: 21.03.2017)
15. Еженедельная отраслевая электронная газета. Пути повышения надежности и точности измерений температуры с помощью термопар. Изложение доклада В.А. Каржавина и А.В. Каржавина – 2010 г [Электронный ресурс]. URL: http://sv.ke.mrsk.ru/sv/images/doc/EnPress/EnPress_15_2011.pdf (дата обращения: 28.03.2017)
16. Методические указания к выполнению лабораторных работ по электрическим измерениям/ Часть 3/Сост. В. Я. Артемьев, И. А. Карабанов, Д. Н. Мокиенко - Л.: издательство ЛЭТИ, 1983.
17. Переносной потенциометр ПП-63. Порядок измерений [Электронный ресурс]. URL: <http://fazaa.ru/kipia/perenosnoj-potenciometr-pp-63-poryadok-izmerenij.html> (дата обращения: 04.04.2017)

18. Статья: Термопара, принцип действия. Основы термоэлектричества. [Электронный ресурс]. URL: http://www.7caika.com.tesey.com/documents/stati/stati_19.html (дата обращения: 04.04.2017)

19. ГОСТ 12.0.003–2015 «Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [Электронный ресурс]. URL: http://allgosts.ru/13/100/gost_12.0.003-2015 (дата обращения: 04.05.2017)

20. ГОСТ 12.4.113-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Работы учебные лабораторные. Общие требования безопасности» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/21713/> (дата обращения: 04.05.2017)

21. ГОСТ 12.2.007.0-75 «Изделия электротехнические. Общие требования безопасности» [Электронный ресурс]. URL: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/6/6884/ (дата обращения: 04.05.2017)