

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЕ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИСиС»
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

К.В. Лицин, Р.Е. Мажирина

Метрология

Лабораторный практикум
для студентов направлений подготовки
13.03.02 "Электроэнергетика и электротехника",
15.03.02 "Технологические машины и оборудование",
13.03.01 "Теплоэнергетика и теплотехника",
всех форм обучения

Новотроицк, 2017 г.

Рецензенты:

*Доцент ФГАОУ ВО "Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет)", к.т.н. Басков С.Н.*

*Доцент ФГБОУ ВО "Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.Н. Носова", к.т.н. Белый А.В.*

Метрология / Лицин К.В., Мажирина Р.Е.: Лабораторный практикум. –
Новотроицк: НФ НИТУ МИСиС, 2017. – 74 с.

Лабораторный практикум предназначен для студентов направлений подготовки 13.03.02 "Электроэнергетика и электротехника", 15.03.02 "Технологические машины и оборудование" и 13.03.01 "Теплоэнергетика и теплотехника", изучающих дисциплины: "Метрология, технические измерения и приборы" и "Метрология, стандартизация и сертификация". В данной части пособия рассмотрено применение программы MicroCap и Excel для исследования метрологических характеристик различных приборов и методов измерения. Приведены виртуальные лабораторные работы по темам: "Исследование прямых измерений", "Исследование косвенных измерений", "Исследование совокупных и совместных измерений", "Исследование мостовых схем измерения электрических величин", "Исследование термоэлектрических измерительных преобразователей".

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

ISBN 978-5-903472-26-0

© ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС»
Новотроицкий филиал, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3	
ИССЛЕДОВАНИЕ СОВОКУПНЫХ И СОВМЕСТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	25
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4	
ИССЛЕДОВАНИЯ МОСТОВЫХ СХЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	36
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	50
ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ "МЕТРОЛОГИЯ"	60
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	72
ПРИЛОЖЕНИЕ А	73

ВВЕДЕНИЕ

Метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Предметом метрологии является извлечение количественной информации о свойствах объектов с заданной точностью и достоверностью; нормативная база для этого – метрологические стандарты. Цель настоящего лабораторного практикума – углубление и закрепление теоретических знаний по применению методов расчета и оценки различных измерений, а также приобретение навыков работы с техническими приборами.

Все лабораторные работы выполняются с использованием программного обеспечения MicroCap или Excel.

Вариант лабораторных работ выбирается в соответствии с номером студента в списке группы.

Защита лабораторных работ проводится устно, для этого студент должен иметь отчет о проведенной работе. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- теоретические сведения;
- структурные схемы исследования;
- результаты исследования;
- ответы на контрольные вопросы;
- библиографический список.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: Изучить методические погрешности при прямых измерениях.

1 Теоретическое введение

Измерения классифицируются по нескольким признакам, наиболее важные из которых представлены в виде схемы, изображенной на рисунке 1.1

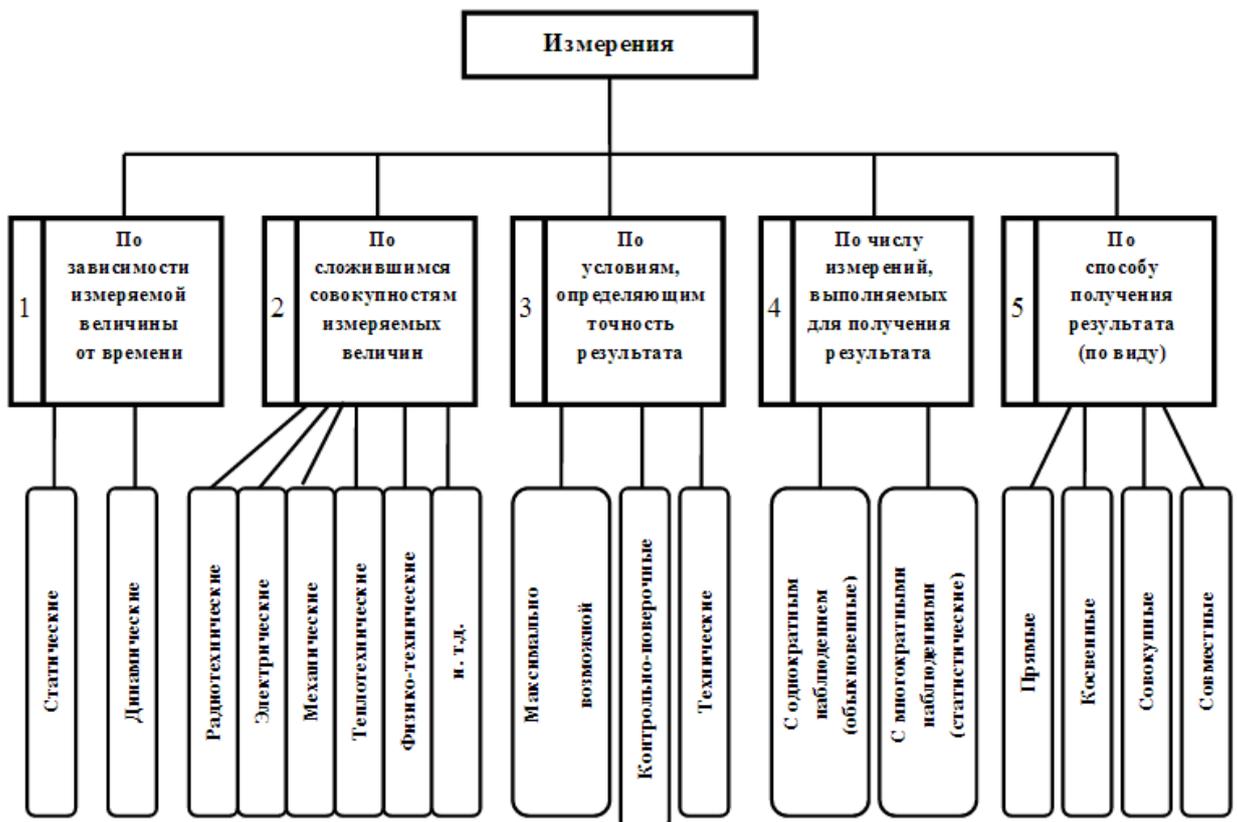


Рисунок 1.1 – Классификация измерений

По первому признаку измерения подразделяются на статические, при которых измеряемая величина (ИВ) остаётся постоянной во времени в процессе измерения, и динамические, при которых ИВ изменяется в процессе измерения.

Классификация по второму признаку является в большей степени условной, однако широко применяется в измерительной технике.

По третьему признаку измерения подразделяются на 3 класса.

Измерения максимально возможной точности, достижимой при современном уровне техники – это измерения, связанные с созданием и воспроизведением эталонов.

Контрольно-поверочные измерения – это измерения, погрешности которых не должны превышать заданного значения. Такие измерения осуществляются в основном государственными и ведомственными метрологическими службами и ремонтными организациями.

Технические измерения – это измерения, в которых погрешность результата определяется метрологическими характеристиками средств измерения. Технические измерения являются наиболее распространёнными и выполняются во всех отраслях хозяйства и науки.

По четвертому признаку измерения классифицируются в зависимости от числа наблюдений многократные и однократные.

Под наблюдением понимают экспериментальную операцию, выполняемую в процессе измерения, в результате которой получают одно значение из серии значений величин, подлежащих совместной обработке для получения результата измерений.

По пятому признаку измерения подразделяются в зависимости от вида уравнения измерения, что и определяет способ получения результата. В лабораторной работе №1 подробно остановимся на одном из подвидов данных измерений – прямых измерениях. В ходе выполнения прямых измерений искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных (согласно показаниям измерительного прибора).

Понятие прямого измерения тесно связано с наблюдением. Наблюдение представляет собой целенаправленное восприятие явлений объективной действительности, в ходе которого наблюдатель получает знание о внешних сторонах, свойствах и отношениях изучаемого объекта.

Научное наблюдение всегда обусловлено той или иной научной идеей, опосредуется теоретическим знанием, которое показывает, что наблюдать и как наблюдать. Прямое измерение представляет собой непосредственно эмпирическую процедуру. Оно выступает как сравнение некоторого измеряемого свойства с эталоном.

Эталон – это особая вещь, которая обеспечивает сохранение и воспроизведение некоторого выделенного свойства, по которому измеряют определённый класс величин. Эталон служит первой основой для введения единиц измерения. В процессе развития прямых измерений постепенно создаются измерительные приборы, которые позволяют через ряд шагов сравнивать измеряемую величину с эталоном. В сложных случаях эмпирического исследования прямое измерение может осуществляться в процессе эксперимента, выступать как его элемент.

В ходе прямых измерений необходимо образуется результат, который может быть выражен двумя способами.

Абсолютный способ выражения результата предполагает прямые измерения одной или нескольких основных величин или использование значений физических констант.

Примером абсолютных измерений может служить определение длины в метрах, силы электрического тока в амперах, ускорения свободного падения в метрах на секунду в квадрате.

При относительном способе выражения результата измеряется отношение измеряемой величины к одноименной величине, которая выполняет роль единицы измерения, или к одноименной величине, которая принята за исходную величину. В качестве примера относительных измерений можно привести измерение относительной влажности воздуха, определяемой как отношение количества водяных паров в 1 м^3 воздуха к количеству водяных паров, которое насыщает 1 м^3 воздуха при данной температуре.

2 Выполнение работы

2.1 Используя программу MicroCap, собрать схему, изображенную на рисунке 2.1. Величина сопротивления R1 (сопротивление нагрузки) и напряжения V1 выбирается из таблицы 2.1 согласно своему варианту.

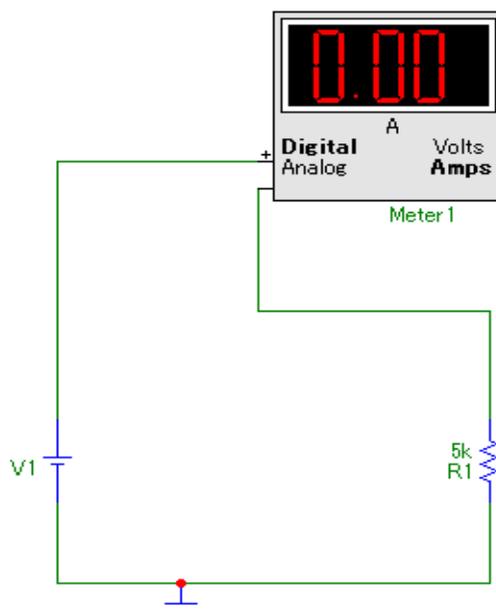


Рисунок 2.1 – Схема исследования при идеальном амперметре

Элемент "Meter1", исполняющий роль амперметра, находится по пути: Animation–AnimatedMeter.

Таблица 2.1 – Исходные данные

№ варианта	V1, В	R1, Ом	№ варианта	V1, В	R1, Ом
1	2	3	4	5	6
1	5	5000	14	21	3000
2	7	4500	15	23	5500
3	9	4000	16	20	6000
4	10	3500	17	18	5000
5	15	4000	18	17	4500
6	20	3000	19	6	4000
7	25	5500	20	7	3500
8	6	6000	21	10	4000

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6
9	8	5000	22	11	3000
10	11	4500	23	13	5500
11	13	4000	24	14	6000
12	14	3500	25	12	3500
13	12	4000			

2.2 Провести измерение, нажав Analysis – Transient –Run. Закрыть окно с графиками. Результат, полученный на экране мультиметра (Meter1), записать в таблицу 2.2 во вторую строку во все столбцы (Ид, идеальный ток). Объяснить, почему во всех случаях данная величина принимает одинаковые значения.

2.3 Провести повторное измерение, учитывая, что мультиметр не идеален, а имеет внутреннее сопротивление, $R_2=0,1 \cdot R_1$. Для этого собрать схему, аналогичную изображенной на рисунке 2.2.

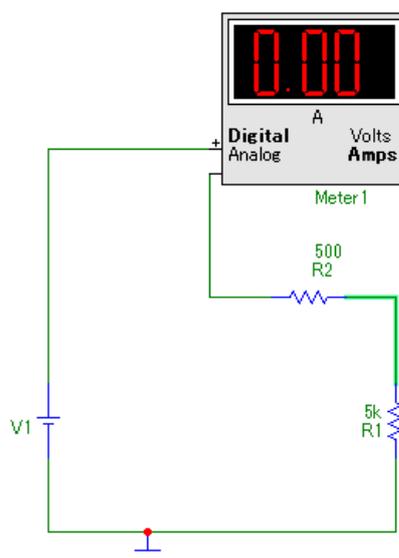


Рисунок 2.2 – Схема исследования при условии неидеальности амперметра

2.4 Провести измерение, нажав Analysis – Transient –Run. Результат, полученный на экране мультиметра, записать в таблицу 2.2 в третью строку во второй столбец (I_p при величине $R_2=0,1 \cdot R_1, \text{Om}$).

2.5 Аналогично провести десять опытов от $R_2=0,1 \cdot R_1$ до $R_2=R_1$ с

целью измерения I_p . Все полученные результаты записать в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Таблица измерений с учетом внутреннего сопротивления амперметра

Внутреннее сопротивление амперметра, R_2 , Ом	0,1· R_1	0,2· R_1	0,3· R_1	0,4· R_1	0,5· R_1	0,6· R_1	0,7· R_1	0,8· R_1	0,9· R_1	R_1
Величина «идеального тока», $I_{ид}$, мА										
Величина реального тока, I_p , мА										
Абсолютная погрешность Δ , мА										
Относительная погрешность δ , %										

2.6 Определить абсолютную погрешность:

$$\Delta = I_p - I_{ид}$$

и относительную погрешность:

$$\delta = \frac{I_p - I_{ид}}{I_{ид}} \cdot 100\%$$

Результаты расчета занести в таблицу 2.2.

2.7 На основании таблицы 2.2 построить график зависимости абсолютной погрешности от соотношения R_2/R_1 , т.е. $\Delta=f(R_2/R_1)$.

2.8 На основании таблицы 2.2 построить график зависимости относительной погрешности от соотношения R_2/R_1 , т.е. $\delta=f(R_2/R_1)$.

2.9 Прodelать аналогичные измерения, учитывая, что провода так же имеют сопротивление, равное 100 Ом. Для этого необходимо собрать схему, изображенную на рисунке 2.3.

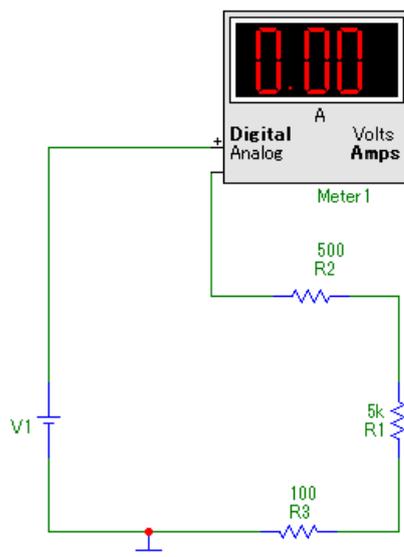


Рисунок 2.3 – Схема исследования с учетом сопротивления проводов

2.10 Снять результаты и занести их в таблицу 2.3 в третью строку (I_{рпр}). Величина I_{ид} берется из таблицы 2.2.

Таблица 2.3 – Таблица измерений с учетом сопротивления проводов

Внутреннее сопротивление амперметра, R ₂ , Ом	0,1·R1	0,2·R1	0,3·R1	0,4·R1	0,5·R1	0,6·R1	0,7·R1	0,8·R1	0,9·R1	R1
Величина «идеального тока», I _{ид} , мА										
Величина реального тока при учете внутреннего сопротивления проводов, I _{рпр} , мА										
Абсолютная погрешность Δ, мА										
Относительная погрешность δ, %										

2.11 Определить абсолютную погрешность:

$$\Delta = I_{\text{РПП}} - I_{\text{ИД}}$$

и относительную погрешность:

$$\delta = \frac{I_{\text{РПП}} - I_{\text{ИД}}}{I_{\text{ИД}}} \cdot 100\%.$$

Результаты расчета занести в таблицу 2.3.

2.12 На основании таблицы 2.3 построить график зависимости абсолютной погрешности от соотношения $R2/R1$, т.е. $\Delta=f(R2/R1)$.

2.13 На основании таблицы 2.3 построить график зависимости относительной погрешности от соотношения $R2/R1$, т.е. $\delta=f(R2/R1)$.

2.14 Сделать выводы по работе.

3 Контрольные вопросы

3.1 Какие виды измерений бывают?

3.2 Что такое наблюдение?

3.3 Приведите классификацию способов измерения.

3.4 Что такое измерение?

3.5 Каким образом можно измерить ток в цепи?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 ИССЛЕДОВАНИЕ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: Изучить методические погрешности при косвенных измерениях.

1 Теоретическое введение

На базе прямых измерений, рассмотренных в лабораторной работе 1, могут быть проведены косвенные измерения. Их идея состоит в том, что они позволяют получить значение измеряемой величины на основе математической зависимости, не прибегая к сравнению с эталоном. Таким путём наука получает численные значения величин в условиях, когда процесс прямого измерения сложен, а также в условиях, когда прямое измерение принципиально невозможно. В отличие от прямого измерения косвенное не является уже эмпирической процедурой, а представляет переход от эмпирического исследования к теоретическому. В своих наиболее простых формах оно непосредственно примыкает к эмпирическому исследованию, но в сложных формах косвенное измерение непосредственно связано с теоретическими расчетами.

В ходе косвенных измерений искомую физическую величину определяют на основании известной зависимости между нею и величинами, подвергаемыми прямым измерениям (площадь прямоугольника определяют по результатам измерения и перемножения сторон, плотность твердого тела – по результатам измерения и последующего деления массы на объем и т.д.).

Например, в электрической цепи, представленной в лабораторной работе 1, на рисунке 2.1, необходимо вычислить величину сопротивления R_1 . Для этого с помощью амперметра измеряют ток в цепи, с помощью вольтметра можно измерить падение напряжения на сопротивлении. На основании закона Ома: $I=U/R$, выразить величину сопротивления и

вычислить ее. Приведенный пример является яркой иллюстрацией косвенного измерения.

В данной лабораторной работе необходимо рассчитать некоторые погрешности. Рассмотрим их подробнее. Погрешность измерений - разность, полученная между истинной (действительной) величиной и результатом измерения. Погрешности могут быть классифицированы следующим образом (рисунок 1.1).

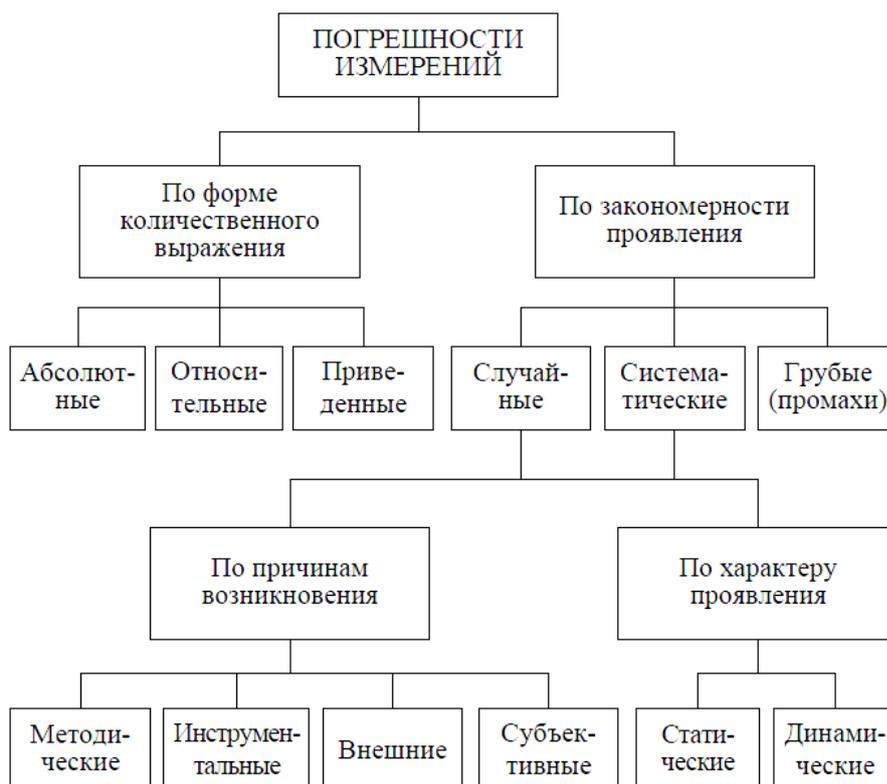


Рисунок 1.1 – Классификация погрешностей измерения

Случайные погрешности - погрешности, вызываемые нерегулярными факторами. Они полностью подчиняются вероятностным законам и обрабатываются методами математической статистики. Определение действительных значений физической величины и случайных погрешностей возможно только при проведении серии измерений при неизменных условиях.

Систематические погрешности – погрешности, вызываемые влиянием постоянных факторов на процесс измерения.

Выявление систематических погрешностей возможно только при изменении условий измерения или проведении измерений с изменением определенного параметра.

Аддитивной погрешностью называется погрешность, постоянная в каждой точке шкалы.

Мультипликативной погрешностью называется погрешность, линейно возрастающая или убывающая с ростом измеряемой величины.

В первой лабораторной работе уже были затронуты относительная и абсолютная погрешность. Рассмотрим их подробнее. Рассмотрим их сходства и различия.

Абсолютная погрешность (Δ) - отклонение от истинного значения в выбранных единицах измерения:

$$\Delta = x_0 - x_i,$$

где x_0 – истинное значение;

x_i – измеренное значение.

Величина погрешности имеет размерность.

Относительная погрешность (δ) – характеризует качество измерений:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0} \cdot 100\%$$

Это есть отношение абсолютной погрешности к измеренной величине или к средней величине.

Возможное представление измеренной величины как с абсолютной, так и с относительной погрешностью: $L = (50 \pm 1)$ см или $L = 50$ см $\pm 2\%$.

Погрешность результата измерений позволяет определить те цифры результата, которые являются достоверными. Нецелесообразно удерживать в выражении для измеренного значения физической величины большое число цифр, так как цифры младших разрядов могут оказаться недостоверными. Распространенной ошибкой при оценивании результатов и погрешностей измерений является вычисление их и запись с большим числом значащих

цифр. Этому способствует использование для расчетов компьютеров, позволяющих получать результаты расчета с четырьмя и более значащими цифрами.

Однако погрешности измерений не всегда требуется знать с очень высокой точностью. В частности, для технических измерений допустимой считается погрешность оценивания погрешности в 15...20%. Соответствующим стандартом установлено, что в численных показателях точности измерений (в том числе и в погрешности) должно быть не более двух значащих цифр.

В практической метрологии выработаны следующие правила округления результатов и погрешностей измерений:

- в выражении погрешности результата измерения удерживается не более двух значащих цифр, причем последняя цифра обычно округляется до нуля или пяти. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и одной - если первая цифра 3 или более;

- числовое значение результата измерения должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности. Иначе говоря, результат измерения округляется до того же десятичного знака, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями. Если десятичная дробь в числовом значении результата измерений оканчивается нулями, то нули отбрасываются до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности. Например, $235,732 \pm 0,15$ округляется до $235,73 \pm 0,15$, но не до $235,7 \pm 0,15$. Результат $4,0800$, погрешность $0,001$; результат округляют до $4,080$. При промежуточных вычислениях целесообразно, чтобы используемые числа содержали на одну значащую цифру больше, чем будет в окончательном результате. Это позволяет уменьшить погрешность от округления;

- если цифра старшего из отбрасываемых разрядов (первая из

отбрасываемых цифр, считая слева направо) меньше пяти, то остающиеся цифры не меняются. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются. Например, $442,749 \pm 0,4$ округляется до $442,7 \pm 0,4$; 174437 при сохранении четырех значащих цифр должно быть округлено до 174400 ;

– если цифра старшего из отбрасываемых разрядов больше или равна пяти, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю сохраняемую цифру увеличивают на единицу. Например, $37,268 \pm 0,5$ округляется до $37,3 \pm 0,5$; $37,253 \pm 0,5$ округляется до $37,3 \pm 0,5$; при сохранении трех значащих цифр число 12567 округляют до 12600 , число $125,67$ - до 126 ;

– если отбрасываемая цифра равна пяти, а следующие за ней цифры неизвестны или нули, то последнюю сохраняемую цифру не изменяют, если она четная, и увеличивают на единицу, если она нечетная. Например, число $232,5$ при сохранении двух значащих цифр округляют до 232 , а число $233,5$ - до 234 ;

– округление следует выполнять сразу до желаемого числа значащих цифр, поэтапное округление может привести к ошибкам. Например, поэтапное округление результата измерения $220,46 \pm 4$ дает на первом этапе $220,5 \pm 4$ и на втором этапе 221 ± 4 , в то время как правильный результат округления 220 ± 4 ;

– округление производят лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.

Особенно внимательно нужно относиться к записи результата измерения без указания погрешности (что крайне нежелательно). В этом случае в записываемом числе оставляются только те цифры, за достоверность которых можно ручаться, т. е. все значащие цифры записанного числа должны быть достоверными. Значащими цифрами числа считаются все цифры от первой слева, не равной нулю, до последней записанной справа цифры, при этом нули, записанные в виде множителя 10^n , не учитываются.

Поэтому записи $2,4 \times 10^3$ В и 2400 В не являются тождественными. Первая запись означает, что верны цифры тысяч и сотен вольт и истинное значение может быть, например, 2,42 или 2,38 кВ. Запись 2400 В означает, что верны и единицы вольт, истинное значение может быть 2400,2 или 2390,8 В, но не 2420 или 2380 В. Например, в результате измерения получено напряжение 3720 В, при этом погрешность измерения составляет 1%. Результат измерения следует записать (если погрешность не указывается) 37×10^2 В, или $3,7 \times 10^3$ В, или 3,7 кВ.

Если руководствоваться приведенными правилами округления, то количество значащих цифр в числовом значении результата измерений дает возможность ориентировочно судить о точности измерения. Это связано с тем, что предельная погрешность, обусловленная округлением, равна половине единицы последнего разряда числового значения результата измерения.

2 Выполнение работы

2.1 Собрать в программе MicroCap возможные схемы включения измерительных приборов (вольтметра и амперметра) для измерения сопротивления участка цепи R_X на основании закона Ома (рисунок 2.1, 2.2).

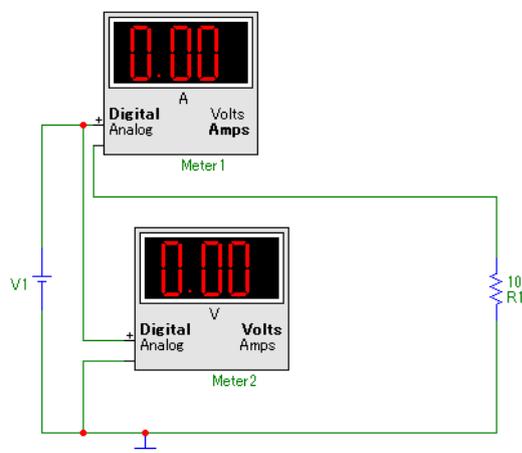


Рисунок 2.1 – Схема исследования №1

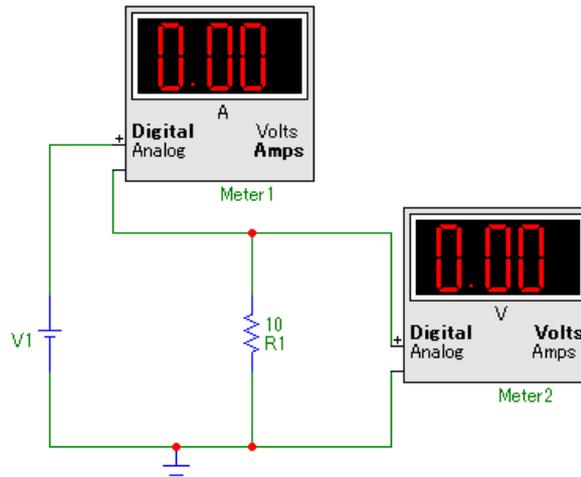


Рисунок 2.2 – Схема исследования №2

2.2 Величину напряжения $V1$ и сопротивления $R1$ взять из таблицы 2.1. Внутреннее сопротивление источника питания r_i считается равным нулю.

Таблица 2.1 – Исходные данные для выполнения лабораторной работы

№ варианта	$V1, В$	Опыт 1, $R1, Ом$	Опыт 2, $R2, Ом$
1	2	3	4
1	5	10	1000
2	7	15	1500
3	9	20	2000
4	10	12	1200
5	15	10	1000
6	20	5	500
7	25	7	700
8	6	8	800
9	8	8,5	850
10	11	15	1500
11	13	12	1200
12	14	13	1300
13	12	14	1400
14	21	13	1300
15	23	10	1000
16	20	15	1500
17	18	8	800
18	17	7	700

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
19	6	10	1000
20	7	5,5	550
21	10	7	700
22	11	7,5	750
23	13	6,5	650
24	14	15	1500
25	12	12	1200

2.3 Провести измерение сопротивления R_X в каждой из схем включения приборов дважды, задавая в качестве измеряемого сопротивления сначала R_1 , Ом (третий столбец таблицы 2.1, опыт 1), а затем R_2 , Ом (четвертый столбец таблицы 2.1, опыт 2). Измеренные значения токов и напряжений занести в таблицу 2.2. Рассчитать величины сопротивления R_X ($R_X = U/I$) по измеренным величинами тока и напряжения. Занести результат в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты измерений идеализированных приборов

Параметр	Опыт 1, R_1		Опыт 2, R_2	
	Схема 1	Схема 2	Схема 1	Схема 2
U, В				
I, А				
R_X , Ом				

Рассчитанные значения сопротивлений R_{X1} и R_{X2} при разных схемах включения должны быть одинаковы, особого предпочтения одной из схем включения приборов отдавать не стоит. Возможно использование любой из схем, т. к. применялись идеализированные приборы.

2.4 Для тех же схем включения приборов и тех же значений R_1 и R_2 реализуем процедуру измерения их реальными приборами. Для этого при измерении тока последовательно с мультиметром включаем сопротивление $R_A=1$ Ом, имитирующее внутреннее сопротивление амперметра, а при измерении напряжения параллельно входным зажимам мультиметра

подключаем сопротивление $R_V=5000\text{Ом}$, имитирующее внутреннее сопротивление вольтметра. В результате схеме, изображенной на рисунке 2.1, станет аналогичная схема, представленная на рисунке 2.3. Схеме, изображенной на рисунке 2.2, станет аналогичная схема, представленная на рисунке 2.4.

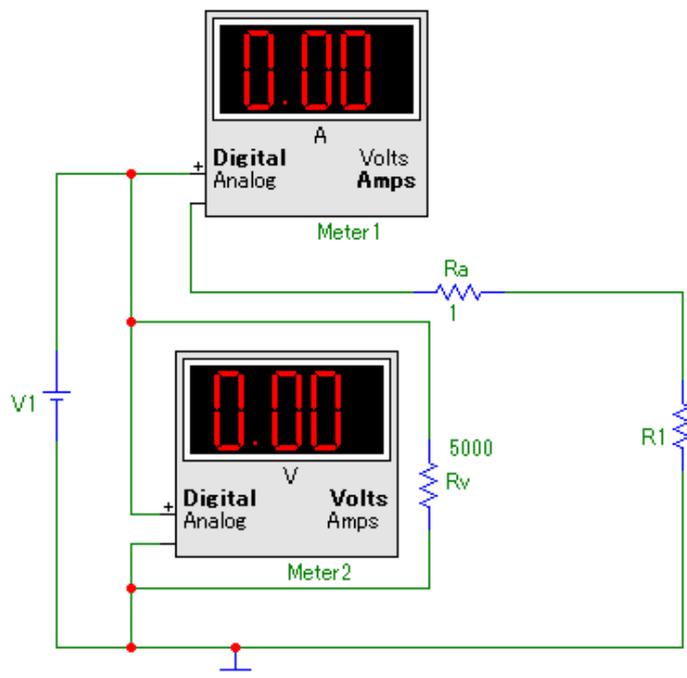


Рисунок 2.3 – Схема исследования №1 с учетом сопротивлений приборов

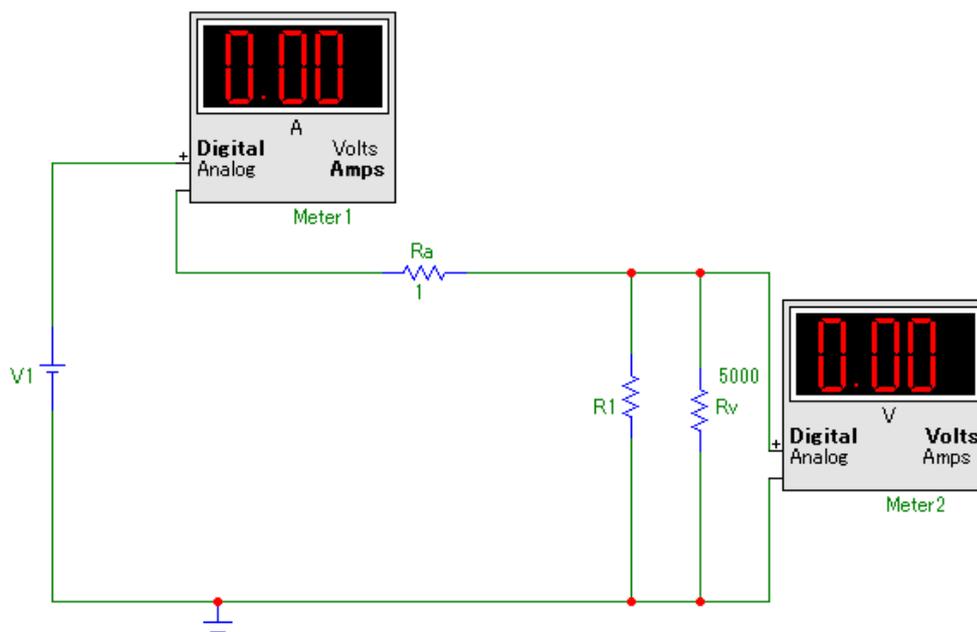


Рисунок 2.4 – Схема исследования №2 с учетом сопротивлений приборов

2.5 Провести измерения напряжения и тока в каждой из схем при различных величинах сопротивления (R_1 и R_2). Результаты занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты измерений приборов с учетом внутренних сопротивлений

Параметр	Опыт 1, R_1		Опыт 2, R_2	
	Схема 1	Схема 2	Схема 1	Схема 2
U, В				
I, А				
R_x , Ом				

2.6 По показаниям приборов необходимо рассчитать величины сопротивлений R_{x1} и R_{x2} для каждой из схем включения приборов по следствию из закона Ома ($R_x=U/I$).

2.7 Определить абсолютную и относительную погрешности измерений для каждой из схем по формулам, представленным ниже:

$$\Delta R_1 = R_{x1} - R_1 = \text{Ом}$$

$$\Delta R_2 = R_{x2} - R_2 = \text{Ом}$$

$$\delta_1 = \frac{\Delta R_1}{R_{x1}} \cdot 100\% = \%$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta R_2}{R_{x2}} \cdot 100\% = \%$$

2.8 Впервой схеме включения прибора при неизменной величине измеряемого резистора R_x провести ряд измерений его значения, изменяя каждый раз внутреннее сопротивление одного из приборов (например, R_A) и оставляя неизменным внутреннее сопротивление другого (например, R_V), а затем повторить эксперимент, изменяя R_V и оставляя неизменным R_A . Определить для каждого результата погрешность измерения и внести данные в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 -Таблица результатов схемы исследования №1.

$R_H, \text{ Ом}$	$R_A, \text{ Ом}$	$R_V, \text{ Ом}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$\Delta R, \text{ Ом}$	$\delta, \%$
R1	3	5000				
	5					
	7					
	1	10000				
		15000				
		20000				
R2	3	5000				
	5					
	7					
	1	10000				
		15000				
		20000				

2.9 Во второй схеме включения прибора при неизменной величине измеряемого резистора R_X провести ряд измерений его значения, изменяя каждый раз внутреннее сопротивление одного из приборов (например, R_A) и оставляя неизменным внутреннее сопротивление другого (например, R_V), а затем повторить эксперимент, изменяя R_V и оставляя неизменным R_A . Определить для каждого результата погрешность измерения и внести данные в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Таблица результатов схемы исследования №2.

$R_H, \text{ Ом}$	$R_A, \text{ Ом}$	$R_V, \text{ Ом}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$\Delta R, \text{ Ом}$	$\delta, \%$
R1	3	5000				
	5					
	7					
	1					
	1	15000				
		20000				
		5000				
R2	5	5000				
	7	10000				
	1					
	1	15000				
		20000				

2.10 На основании заполненных таблиц построить графики зависимости $\Delta = f(R_A)$, $\Delta = f(R_V)$, $\delta = f(R_A)$, $\delta = f(R_V)$.

3 Контрольные вопросы

3.1 Какие виды погрешностей бывают?

3.2 В чем измеряется абсолютная и относительная погрешность?

3.3 Приведите классификацию погрешностей.

3.4 Изобразите схемы включения амперметра и вольтметра при измерении сопротивления косвенным методом. В чем их различия?

3.5 Приведите примеры косвенных погрешностей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИССЛЕДОВАНИЕ СОВОКУПНЫХ И СОВМЕСТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Цель работы: Изучить методические погрешности при совокупных измерениях. Найти зависимости при проведении совместных измерений.

1 Теоретическое введение

Совокупные измерения – это измерения при которых физическая величина определяется по ряду измерений нескольких одноименных величин, на основании которого составляется система уравнений. Решение этой системы и определяет физическую величину.

Совместные измерения осуществляют измерения двух или нескольких величин для нахождения зависимости между ними.

Совокупные и совместные измерения позволяют определить искомые значения величины x_1, x_2, \dots, x_n , не поддающиеся непосредственному наблюдению, по результатам измерения значений других величин y_1, y_2, \dots, y_m , которые являются их функциями:

$$\begin{cases} y_1 = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ y_2 = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots \\ y_m = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases} \quad (1.1)$$

После проведения прямых измерений значений величин Y_j результаты этих измерений подставляются в систему уравнений 1.1, решение которой позволяет найти искомые значения одноименных (при совокупных) или неоднородных (при совместных) величин x_1, x_2, \dots, x_n .

При совокупных измерениях непосредственно измеряют значения различных сочетаний одноименных величин, каждое из которых в отдельности измерить невозможно.

В совместных измерениях необходимо найти зависимость между несколькими неоднородными величинами.

Если в результатах прямых измерений величин Y_j содержатся случайные погрешности, то они имеются и в результатах совместных (совокупных) измерений величин X_i . Очевидно, что при $m < n$ систему 1.1 вообще решить невозможно; при $m = n$ такое решение алгебраически возможно, однако погрешности результатов измерений величин X_i будут, как и при прямых однократных измерениях, велики, и числовое значение этих погрешностей останется неизвестным.

При $m > n$ система становится алгебраически неразрешимой, так как эти уравнения несовместимы, поскольку правые части уравнений 1.1 вместо точных значений Y_j содержат результаты их измерений $y_j = Y_j + \Delta Y_j$ со случайными погрешностями ΔY_j . Однако в последнем случае при нормальном законе распределения ошибок измерения величин y_j (что обычно и бывает) можно найти такую совокупность значений x_i , которая с наибольшей вероятностью удовлетворяла бы исходным зависимостям 1.1. Это может быть осуществлено с помощью способа наименьших квадратов (принцип Лежандра).

Последовательность обработки результатов совокупных и совместных измерений включает в себя следующие шаги.

1. Выясняется вид искомой зависимости между величинами.

С этой целью строятся графики зависимости величины Y от X_i . По характеру расположения экспериментальных данных выбирается вид зависимости.

Например, результаты измерений величин Y линейно возрастают (или убывают) с изменением результатов измерений величин X_j , или характер расположения экспериментальных точек близок к гиперболической зависимости, как это показано на рисунке 1.1.

Производится оценивание полученных результатов, выявляются опыты, содержащие грубые погрешности или промахи, которые исключаются из дальнейшей обработки.

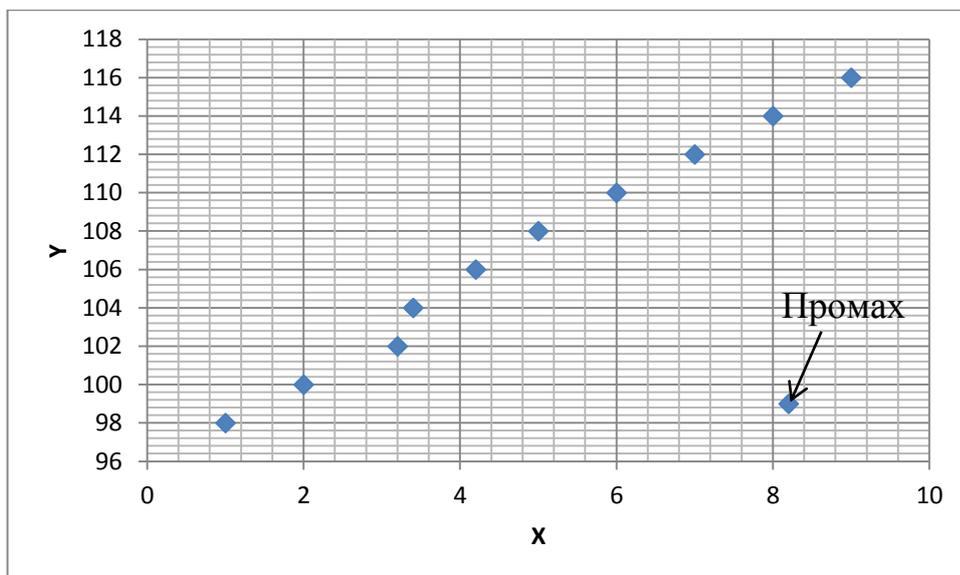


Рисунок 1.1 – Пример зависимости величины Y величин Xi с указанием промаха

2. В соответствии с выполненным анализом строится уравнение зависимости величины Y от Xi. В случае нелинейной зависимости между величинами Y и какой-то величиной из Xi производится линеаризация путем замены этой величины новой переменной. Пусть, например, при изменении величин Xi наблюдается линейное изменение величины Y. Тогда вид уравнения будет следующий:

$$Y = A_1 \cdot X_1 + A_2 \cdot X_2 + \dots + A_k \cdot X_k + \dots + A_n \cdot X_n + A_j, \quad (1.2)$$

где A_k - параметры, которые необходимо оценить.

3. Путем подстановки в уравнение (1.2) значений результатов прямых измерений величин Y и Xj может быть получена система из m (по числу опытов), так называемых условных уравнений:

$$\begin{cases} Y^{(1)} = A_1 \cdot X_1^{(1)} + A_2 \cdot X_2^{(1)} + \dots + A_n \\ Y^{(2)} = A_1 \cdot X_1^{(2)} + A_2 \cdot X_2^{(2)} + \dots + A_n \\ \dots \\ Y^{(m)} = A_1 \cdot X_1^{(m)} + A_2 \cdot X_2^{(m)} + \dots + A_n \end{cases}$$

4. Поскольку в результатах прямых измерений величин Y и Xi

содержатся случайные погрешности, определяются невязки или остаточные погрешности, определяются невязки или остаточные погрешности условных уровней – v_j :

$$\begin{cases} v_1 = a_1 \cdot x_1^{(1)} + a_2 \cdot x_2^{(1)} + \dots a_{j-y} \\ v_2 = a_1 \cdot x_1^{(2)} + a_2 \cdot x_2^{(2)} + \dots a_{j-y} \\ \dots \\ v_m = a_1 \cdot x_1^{(m)} + a_2 \cdot x_2^{(m)} + \dots a_{j-y} \end{cases}$$

Отметим, что на практике пункты 3 и 4 могут не выполняться, а их выполнение только подразумевается.

Оценивание параметров A_k производится методом наименьших квадратов, смысл которого состоит в минимизации суммы квадратов остаточных погрешностей условных уравнений:

$$S^2 = \sum \mathcal{Q}^2 = \sum_{i=1}^n (a_1 \cdot x_1^{(i)} + a_2 \cdot x_2^{(i)} + \dots a_j - y^{(i)})^2 \rightarrow \min$$

где S^2 - сумма квадратов остаточных погрешностей условных уравнений.

Функция S^2 достигает минимума, когда равны нулю все частные производные по искомым параметрам:

$$\frac{dS^2}{da_1} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (a_1 \cdot x_1^{(i)} + a_2 \cdot x_2^{(i)} + \dots + a_j - y^{(i)}) \cdot x_1^{(i)} = 0$$

$$\frac{dS^2}{da_2} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (a_1 \cdot x_1^{(i)} + a_2 \cdot x_2^{(i)} + \dots + a_j - y^{(i)}) \cdot x_2^{(i)} = 0$$

...

$$\frac{dS^2}{da_j} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (a_1 \cdot x_1^{(i)} + a_2 \cdot x_2^{(i)} + \dots + a_j - y^{(i)}) = 0$$

Далее опускаются для упрощения записи пределы суммирования при записи знака суммы \sum , которые остаются постоянными от $i=1$ до $i=n$.

После преобразования получается система из i так называемых нормальных уровней с i неизвестными:

$$\begin{cases} a_1 \cdot \sum x_1^{\ominus} + a_2 \cdot \sum x_1^{\ominus} \cdot x_2^{\ominus} + \dots + a_i - \sum x_1^{\ominus} = \sum y^{\ominus} \cdot x_1^{\ominus} \\ a_1 \cdot \sum x_1^{\ominus} \cdot x_2^{\ominus} + a_2 \cdot \sum x_2^{\ominus} + \dots + a_i - \sum x_2^{\ominus} = \sum y^{\ominus} \cdot x_2^{\ominus} \\ \dots \\ \dots \\ a_1 \cdot \sum x_1^{\ominus} + a_2 \cdot \sum x_2^{\ominus} + \dots + n - a_i = \sum y^{\ominus} \end{cases}$$

Полученная система уравнений решается методом Крамера через определители:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\Delta_1}{\Delta} \\ a_2 &= \frac{\Delta_2}{\Delta} \\ &\dots \\ a_i &= \frac{\Delta_i}{\Delta} \end{aligned}$$

где главный определитель Δ равен:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \sum x_1^{\ominus} & \sum x_1^{\ominus} \cdot x_2^{\ominus} & \dots & \sum x_1^{\ominus} \\ \sum x_1^{\ominus} \cdot x_2^{\ominus} & \sum x_2^{\ominus} & \dots & \sum x_2^{\ominus} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum x_1^{\ominus} & \sum x_2^{\ominus} & \dots & n \end{vmatrix}$$

Определители $\Delta_1; \Delta_2; \dots; \Delta_i$ получаются путем замены в главном определителе столбца при оцениваемом параметре $a_1; a_2; \dots; a_i$ соответственно столбцом со свободными членами.

Таким образом, получается уравнение зависимости между величинами Y и X_i :

$$y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_i$$

Подстановкой в полученное уравнение результатов прямых измерений величин X_i вычисляют оценки величин Y и, сравнивая их с результатами измерений y , находят невязки или остаточные погрешности условных уравнений:

$$\begin{aligned} Y^{\ominus} &= a_1 \cdot x_1^{\ominus} + a_2 \cdot x_2^{\ominus} + \dots + a_i \\ v_1 &= Y^{\ominus} - y^{\ominus} = a_1 \cdot x_1^{\ominus} + a_2 \cdot x_2^{\ominus} + \dots + a_i - y^{\ominus} \end{aligned}$$

Результаты этих вычислений целесообразно оформить в виде таблицы, представленной ниже.

Таблица 1.1 – Результаты сравнения исходного и вычисленного значений

№ опыта	$Y_{исх}^{(i)}$	$Y_{выч}^{(i)}$	v_i	v_i^2
1	$Y_{исх}^{(1)} - Y_{выч}^{(1)}$	v_1
...	$Y_{исх}^{(2)} - Y_{выч}^{(2)}$	v_2
n	$Y_{исх}^{(n)} - Y_{выч}^{(n)}$	v_n
Итого				$\sum v_i^2$

7. Определяется оценка дисперсии условных уравнений:

$$S_1^2 = \frac{1}{n-l} \cdot \sum g_i^2,$$

где l – число уравнений в системе.

8. Определяются оценки дисперсии параметров A_k :

$$S_{a_k}^2 = \frac{\Delta_{kk}}{\Delta} \cdot S_1^2,$$

где Δ_{kk} – алгебраическое дополнение, получаемое путем удаления из матрицы главного определителя строки и столбца, на пересечении которых находится оцениваемый параметр.

Вычисляются оценки среднего квадратического отклонения параметров A_k :

$$S_{a_k} = \sqrt{S_{a_k}^2}.$$

9. Вычисляются доверительные погрешности оцениваемых параметров по t – критерию Стьюдента при заданной доверительной вероятности (обычно в технических измерениях $P=0,95$ и числе степеней свободы $(n-t)$):

$$\delta_{p,a_k} = t_p \cdot S_{a_k}$$

Величина критерия Стьюдента представлена в приложении А.

10. Результаты окончательной оценки параметров A_k записываются в виде:

$$A_k = A_k \pm \delta_{p,a_k}$$

11. Для качественной оценки полученной зависимости целесообразно построить график

$$Y_{выч}^{(i)} = f(Y_{исх}^{(i)})$$

Таким образом, проводится нахождение зависимости двух величин, т.е. совместные измерения.

2 Выполнение работы

2.1 В ходе проведения опытов было установлено, что при изменении температуры величина сопротивления принимала следующие значения (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Исходные данные

№ варианта	Измеряемые величины	Результаты измерений
1	2	3
1	R, Ом	800 803 810 812 815 822 823 827 830 833 836 840 842
	t, °C	25 28 33 35 38 40 43 45 48 50 52 55 57
2	R, Ом	700 703 710 712 715 722 723 727 730 733 736 740 742
	t, °C	23 28 31 32 36 40 43 45 48 50 52 56 59
3	R, Ом	900 906 912 920 927 936 945 950 956 962 968 973 978
	t, °C	43 48 51 55 58 62 66 69 73 77 80 83 87
4	R, Ом	854 857 860 862 865 870 873 877 880 885 886 890 894
	t, °C	23 28 33 36 37 39 41 56 42 43 45 45 47
5	R, Ом	954 957 960 962 965 970 973 977 980 983 986 990 993
	t, °C	53 58 61 72 76 80 83 85 88 90 92 96 119
6	R, Ом	854 857 862 862 865 870 873 877 880 885 886 890 894
	t, °C	23 28 33 36 37 39 41 56 42 43 45 45 47
7	R, Ом	714 717 720 862 715 716 718 721 723 725 723 726 728
	t, °C	23 28 33 36 37 39 41 42 42 43 45 45 47
8	R, Ом	834 837 840 842 845 846 848 721 843 850 853 856 858
	t, °C	33 34 35 36 37 39 41 42 42 43 45 45 47
9	R, Ом	902 906 910 918 927 1036 945 950 954 962 967 972 981
	t, °C	45 58 61 64 68 72 74 78 81 84 87 90 92
10	R, Ом	1000 1006 1012 1020 1023 1026 1027 1027 909 1032 1033 1034 1036
	t, °C	53 58 63 65 68 69 91 63 65 70 67 69 71
11	R, Ом	754 757 758 762 515 766 768 771 774 775 777 779 781
	t, °C	23 28 33 36 37 39 39 40 42 43 44 45 45

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
12	R, Ом	836 838 841 842 845 846 848 721 843 850 853 854 857
	t, °C	33 34 35 36 38 39 41 42 42 43 45 45 47
13	R, Ом	1004 1006 1012 1020 1023 1026 1027 1027 929 1032 1033 1034 1036
	t, °C	25 28 33 35 38 40 43 45 48 90 52 55 57
14	R, Ом	700 703 710 712 715 722 723 727 730 733 736 740 742
	t, °C	23 28 31 32 36 40 43 45 48 50 52 56 59
15	R, Ом	900 906 912 920 927 936 945 950 956 962 968 973 978
	t, °C	43 48 51 55 58 62 66 69 73 77 80 83 87
16	R, Ом	903 907 910 912 917 926 935 940 945 952 958 963 968
	t, °C	43 48 51 55 58 62 66 69 73 77 80 83 87
17	R, Ом	954 957 960 962 965 970 973 977 980 983 986 990 993
	t, °C	53 58 61 72 76 80 83 85 88 90 92 96 119
18	R, Ом	810 813 815 818 819 822 823 827 830 833 836 840 842
	t, °C	25 28 33 35 38 40 43 45 48 50 52 55 57
19	R, Ом	700 703 710 712 715 722 723 727 730 733 736 740 742
	t, °C	23 28 31 32 36 40 43 45 48 50 52 56 59
20	R, Ом	954 957 960 962 965 970 973 977 980 983 986 990 993
	t, °C	53 58 61 72 76 80 83 85 88 90 92 96 119
21	R, Ом	700 703 710 712 715 722 723 727 730 733 736 740 742
	t, °C	23 28 31 32 36 40 43 45 48 50 52 56 59
22	R, Ом	900 906 912 920 927 936 945 950 956 962 968 973 978
	t, °C	43 48 51 55 58 62 66 69 73 77 80 83 87
23	R, Ом	900 906 912 920 927 936 945 950 956 962 968 973 978
	t, °C	43 48 51 55 58 62 66 69 73 77 80 83 87
24	R, Ом	954 957 960 962 965 970 973 977 980 983 986 990 993
	t, °C	53 58 61 72 76 80 83 85 88 90 92 96 119
25	R, Ом	854 857 860 862 865 870 873 877 880 885 886 890 894
	t, °C	23 28 33 36 37 39 41 56 42 43 45 45 47

2.2 Определить параметры уравнения, описывающего зависимость между температурой и сопротивлением элемента.

$$R = f(t)$$

2.3 По исходным данным (таблица 2.1) построить график зависимости. Из него очевидно, что вид уравнения будет следующий:

$$y = a_1 \cdot x + a_2,$$

где a_1, a_2 – искомые коэффициенты

2.4 Для дальнейшего нахождения необходимых коэффициентов a_1 и a_2 необходимо воспользоваться минимизацией функции:

$$S^2 = \sum \mathcal{G}^2 = \sum_{i=1}^n (a_1 \cdot x_1^{(i)} + a_2 - y^{(i)})^2 \rightarrow \min$$

2.5 Функция S^2 достигает минимума, когда равны нулю все частные производные по искомым параметрам. На данном этапе необходимо найти частные производные $\frac{dS^2}{da_1}$, $\frac{dS^2}{da_2}$ и записать их себе в отчет.

2.6 В результате преобразования полученных частных производных будет получена система уравнений:

$$\begin{cases} a_1 \sum (x^{(i)})^2 + a_2 \sum x^{(i)} = \sum x^{(i)} \cdot y^{(i)} \\ a_1 \sum x^{(i)} + n \cdot a_2 = \sum y^{(i)} \end{cases}$$

где $X^{(i)}$ – температура;

$Y^{(i)}$ – сопротивление;

n – число измерений.

Необходимо найти составляющие данной системы уравнений: $\sum (x^{(i)})^2$; $\sum x^{(i)}$; $\sum x^{(i)} \cdot y^{(i)}$; $\sum y^{(i)}$ и решить ее, что позволит получить величины коэффициентов a_1 и a_2 .

2.7 Сравнить найденные коэффициенты с коэффициентами, которые необходимо рассчитать в программе Excel. Для этого в Excel построить график зависимости $R=f(t)$. Нажать на него правой кнопкой. Выбрать «Добавить линию тренда». В появившемся диалоговом окне в разделе «Построение линии тренда» указать «Линейная». В нижней части диалогового окна отметить галочку напротив надписи «Показывать уравнение на диаграмме» (рисунок 2.1).

В результате на графике появится уравнение вида $y=a_1x+a_2$. Величина a_1 и a_2 , указанные на этом уравнении должны совпадать с ранее рассчитанными.

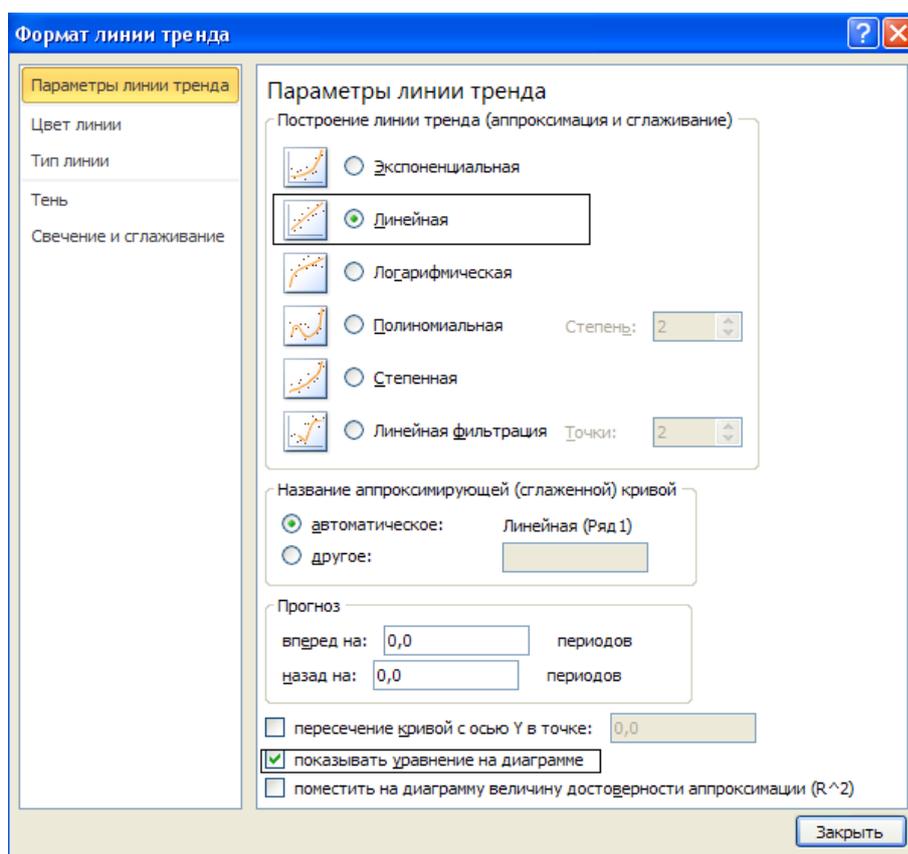


Рисунок 2.1 – Настройка получения коэффициентов a_1 и a_2 в программе Excel

2.8 В полученное уравнение $y = a_1 \cdot x + a_2$ подставить результаты прямых измерений величин X_i (температуру) и вычислить оценки величин Y (сопротивления) и, сравнить их с исходными величинами сопротивления. Результаты представить в виде таблицы 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты сравнения исходного и вычисленного значения сопротивления

№ опыта	$Y_{исх}^{(i)}$ (сопротивление из таблицы 2.1)	$Y_{выч}^{(i)}$ (сопротивление вычисленное по уравнению $y = a_1 \cdot x + a_2$)	v_i	v_i^2
1	$Y_{исх}^{(1)} - Y_{выч}^{(1)}$	v_1
...	$Y_{исх}^{(2)} - Y_{выч}^{(2)}$	v_2
n			$Y_{исх}^{(n)} - Y_{выч}^{(n)}$	v_n
Итого				$\sum v_i^2$

2.8 Найти оценку интервала доверительной погрешности. Для этого выполнить пункты 7-11 из последовательности обработки результатов совокупных и совместных измерений. Критерий Стьюдента выбирается при надежности $\alpha=0,95$.

2.9 Сделать выводы по работе.

3 Контрольные вопросы

3.1 Что такое совокупные измерения?

3.2 Что такое совместные измерения?

3.3 В чем отличие совместных измерений от совокупных?

3.4 Приведите формулу оценки дисперсии.

3.5 Приведите способы решения системы линейных уравнений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЯ МОСТОВЫХ СХЕМ

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Цель работы: Изучить принципы измерения электрических величин с помощью сравнения с мерой.

1 Теоретическое введение

Методы сравнения с мерой - методы, при которых производится сравнение измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой (например, измерение объема жидкости мерным сосудом, измерение массы рычажными весами и т.п.). Сравнение может быть непосредственным или опосредованным через другие величины, однозначно связанные с первыми. Отличительной чертой методов сравнения является непосредственное участие в процессе измерения меры известной величины, однородной с измеряемой. К методам сравнения с мерой относятся следующие: нулевой, дифференциальный, замещения, совпадения. При использовании нулевого метода измерения разность измеряемой и известной величин или разность эффектов, производимых измеряемой и известной величинами, сводится в процессе измерения к нулю, что фиксируется высокочувствительным прибором - нуль-индикатором. При высокой точности мер, воспроизводящих известную величину, и высокой чувствительности нуль-индикатора может быть достигнута высокая точность измерений. Примером применения нулевого метода является измерение сопротивления резистора с помощью четырехплечевого моста, в котором падение напряжения на резисторе с неизвестным сопротивлением уравновешивается падением напряжения на резисторе известного сопротивления.

При использовании дифференциального метода разность измеряемой величины и величины известной, воспроизводимой мерой, находится с помощью измерительного прибора. Неизвестная величина определяется по

известной величине и измеренной разности. В этом случае уравнивание измеряемой величины известной величиной производится не полностью, и в этом заключается отличие дифференциального метода от нулевого. Дифференциальный метод также может обеспечить высокую точность измерения, если известная величина воспроизводится с высокой точностью и разность между ней и неизвестной величиной мала.

Примером измерения с использованием этого метода является измерение напряжения постоянного тока с помощью дискретного делителя напряжения и вольтметра. Неизвестное напряжение определится: $U_x = U_0 + \Delta M_x$, где U_0 - известное напряжение; ΔM_x - измеренная разность напряжений.

При применении метода замещения производится поочередное подключение на вход прибора измеряемой и известной величины и по двум показаниям прибора оценивается значение неизвестной величины. Наименьшая погрешность измерения получается в том случае, когда в результате подбора известной величины прибор дает тот же выходной сигнал, что и при неизвестной величине. Этот метод позволяет получить высокую точность измерения при высокой точности меры известной величины и высокой чувствительности прибора. Примером использования этого метода является точное измерение малого напряжения с помощью высокочувствительного гальванометра, к которому сначала подключают источник неизвестного напряжения и определяют отклонение указателя, а затем с помощью регулируемого источника известного напряжения добиваются того же отклонения указателя. При этом известное напряжение равно неизвестному.

При помощи метода совпадения определяют разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов. Примером использования этого метода является измерение частоты вращения детали с помощью мигающей лампы стробоскопа: наблюдая положение метки на

вращающейся детали в моменты вспышек лампы, по частоте вспышек и смещению метки определяют частоту вращения детали.

Самый простой метод сравнения – замена меры на измеряемую величину (рисунок 1.1).

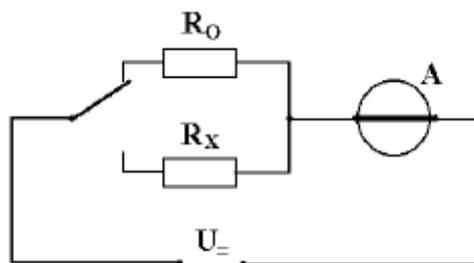


Рисунок 1.1 – Схема замены меры на измеряемую величину

Производится измерение тока, протекающего через сопротивление неизвестной величины:

$$I_x = \frac{U}{R_x} \quad (1.1)$$

После переключения ключа измеряется ток, протекающий через сопротивление известной величины:

$$I_0 = \frac{U}{R_0} \quad (1.2)$$

И наконец, вычисляется величина неизвестного сопротивления:

$$R_x = R_0 \cdot \frac{I_0}{I_x} \quad (1.3)$$

Мосты широко используют для измерения сопротивления, индуктивности, емкости, добротности и угла потерь. На основе мостовых схем выпускают приборы для измерения неэлектрических величин (температуры, перемещений и др.) и различные устройства автоматики. Широкое применение мостов объясняется возможностью получения высокой точности результатов измерений, высокой чувствительностью и возможностью измерения различных величин.

Мостовые цепи обладают одним важным свойством: при определенном соотношении сопротивлений плеч моста напряжение и ток в диагонали

нагрузки полностью отсутствуют при любых значениях $U_{пит}$. В зависимости от характера сопротивлений плеч, образующих мост, и рода тока, питающего его, выделяют мосты постоянного тока и мосты переменного тока. Мосты постоянного тока применяются для измерения сопротивления электрической цепи постоянному току, а также для преобразования сопротивления в ток или напряжение.

Мосты переменного тока применяются для измерения или преобразования в электрический сигнал комплексных сопротивлений, а также в качестве фильтров.

В зависимости от вида схемы (числа плеч) мосты постоянного тока бывают четырехплечие (одинарные) и шестиплечие (двойные). В мостах постоянного тока измеряемая величина представляет собой сопротивление электрической цепи постоянному току и выражается действительным числом. Для уравнивания такой цепи требуется только один регулируемый элемент. Мосты выпускаются с ручным и автоматическим уравниванием.

Схема одинарного моста переменного тока приведена на рисунке 1.2.

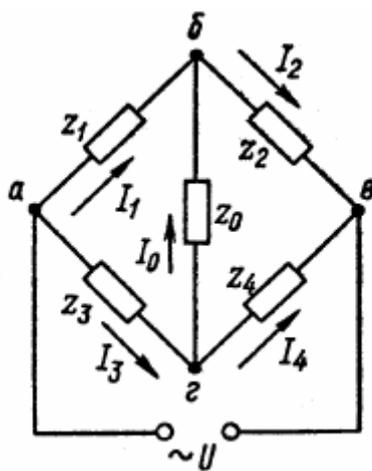


Рисунок 1.2 – Схема одинарного моста

Плечи моста а-б, б-в, а-г, г-в содержат в общем случае комплексные сопротивления $Z_1 - Z_4$. В диагональ б-г, называемую выходной, включается нагрузка (в частном случае прибор - нуль-индикатор) с сопротивлением Z_0 .

Зависимость тока I_0 в нагрузке от параметров моста и напряжения питания U можно найти, например, с помощью законов Кирхгофа:

$$I_0 = U \cdot \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{Z_0(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4) + Z_1 Z_2(Z_3 + Z_4) + Z_3 Z_4(Z_1 + Z_2)} \quad (1.4)$$

Равновесие моста имеет место при таком подборе параметров плеч, чтобы ток в диагонали моста $I_0 = 0$, а значит, при

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad (1.5)$$

т.е. условие (или уравнение) равновесия моста таково: произведения сопротивлений противолежащих плеч моста равны. Если заданы сопротивления любых трех плеч моста, всегда можно определить четвертое сопротивление.

В развернутой форме выражения полных сопротивлений плеч имеют вид:

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 \\ Z_2 &= R_2 + jX_2 \\ Z_3 &= R_3 + jX_3 \\ Z_4 &= R_4 + jX_4 \end{aligned} \quad (1.6)$$

Подставив значения Z_1 - Z_4 в выражение для равновесия моста, получим равенства для мнимых и вещественных членов:

$$\begin{aligned} R_1 R_4 - X_1 X_4 &= R_2 R_3 - X_2 X_3 \\ R_1 X_4 - R_4 X_1 &= R_2 X_3 - R_3 X_2 \end{aligned} \quad (1.7)$$

Наличие двух уравнений равновесия означает необходимость регулировки не менее двух параметров моста переменного тока для достижения равновесия. Для мостов переменного тока имеет значение сходимость моста. Под сходимостью моста понимают возможность достижения состояния равновесия определенным числом поочередных переходов от регулировки одного параметра к регулировке другого.

Условия равновесия моста могут быть выражены иным способом.

Учитывая, что

$$\begin{aligned} Z_1 &= z_1 e^{j\varphi_1} \\ Z_2 &= z_2 e^{j\varphi_2} \\ Z_3 &= z_3 e^{j\varphi_3} \\ Z_4 &= z_4 e^{j\varphi_4} \end{aligned} \quad (1.8)$$

где z_1 - z_4 - модули полных сопротивлений плеч;

φ_1 - φ_4 - углы фазового сдвига тока относительно напряжения в соответствующих плечах.

Условие равновесия можно представить так:

$$z_1 z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = z_2 z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)} \quad (1.9)$$

Из выражения (1.9) следует, что

$$z_1 z_4 = z_2 z_3; \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (1.10)$$

Условие $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$ указывает, при каком расположении плеч в зависимости от характера их сопротивлений можно уравновесить мост. Если смежные плечи, например третье и четвертое, имеют чисто активные сопротивления R_3 и R_4 , т.е. $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$, то сопротивления двух других смежных плеч могут иметь или индуктивный, или емкостный характер.

Если противоположные плечи имеют чисто активные сопротивления, то одно из двух других должно быть индуктивным, а второе - емкостным, т.е. производится уравнивание как действительной, так и мнимой частей тока в диагонали моста.

Иными словами, в мостах переменного тока измеряемая величина выражается комплексным числом, поэтому в данном случае требуются два уравнивающих элемента - соответственно для модуля и аргумента, или активной и реактивной составляющих измеряемого сопротивления. Различают мосты, которые могут быть уравновешены по-другому.

Существуют мостовые цепи, которые уравниваются только по одной из этих составляющих. Такие цепи называют полууравновешенными

или квазиуравновешенными.

Если в уравнение равновесия моста входит частота питающего мост напряжения, то такой мост называют частотно-зависимым, в противном случае - частотно-независимым. Частотно-зависимые мосты применяются в качестве фильтров и для измерения частоты питающего мост напряжения, частотно-независимые - для измерения параметров электрической цепи или их преобразования в ток и напряжение.

В мостах переменного тока часто применяют электронные нуль-индикаторы, входное сопротивление которых приближенно можно считать равным бесконечности. Для этого случая напряжение между точками б и г можно определить по формуле:

$$\dot{U}_{б-г} = \dot{U} \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_4)} \quad (1.11)$$

Мосты, в которых измеряемую величину определяют из условия равновесия $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$, называют уравновешенными. Иногда измеряемую величину можно определять по значению тока или напряжения выходной диагонали моста. Такие мосты называются неуравновешенными.

Схема моста постоянного тока не отличается от рассмотренной схемы (рисунок 1.2). Плечи моста постоянного тока а-б, б-в, а-г, г-в имеют соответственно активные сопротивления $R_1 - R_4$, а в диагональ б - г включают нуль-индикатор постоянного тока, например магнитоэлектрический гальванометр с сопротивлением R_Γ .

Ток в цепи гальванометра для моста постоянного тока равен:

$$I_0 = U \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_\Gamma (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} \quad (1.12)$$

Если мост уравновешен, ток в диагонали б - г равен нулю; для этого необходимо, чтобы

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3.$$

Приведенное равенство показывает возможность подключения объекта в любое плечо моста и определения его сопротивления через сопротивления

трех других плеч.

Процесс измерения с помощью моста заключается в том, что в одно из плеч моста (например, а-б) включают объект с неизвестным сопротивлением R_x , изменяя одно или несколько сопротивлений плеч, добиваются отсутствия тока в цепи гальванометр (нуль-индикатора). Тогда на основании соотношения $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$:

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4} \quad (1.13)$$

Принято R_2 и R_4 называть плечами отношения, а R_3 – плечом сравнения.

Важной характеристикой моста является его чувствительность. Выходной величиной моста может быть ток, напряжение или мощность. Входной величиной является измеряемая величина (сопротивление, индуктивность, емкость и др.). В соответствии с этим различают чувствительность мостовой схемы по току, напряжению или мощности. Приблизительно чувствительность моста определяют как отношение конечных приращений выходной величины и измеряемой величины вблизи равновесия:

$$\dot{S} \approx \frac{\Delta \dot{y}}{\Delta \dot{x}}, \quad (1.14)$$

В мостах переменного тока обычно используют нуль-индикаторы, чувствительные к напряжению и имеющие практически бесконечное сопротивление. Поэтому, как правило, определяют чувствительность мостов переменного тока по напряжению. Относительная чувствительность мостовой схемы переменного тока по напряжению

$$\dot{S}_{mU} = \frac{\dot{U}_{\sigma-\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}}$$

где ε – отношение приращения полного сопротивления к сопротивлению плеча моста.

Чем выше чувствительность собственно моста S_m , тем грубее может быть измерительный прибор, установленный в диагонали моста $S_{\text{приб}}$.

Чувствительность по переменному току – комплексная величина и зависит от фазового угла, поэтому при настройке равновесия моста переменного тока необходима постоянная компенсация фазы. В ходе выполнения данной работы чувствительность по переменному току не учитывается.

2 Выполнение работы

2.1 Провести исследование разновременного метода сравнения. Для этого собрать схему, представленную на рисунке 2.1. Элемент Switch1 находится по пути: Animation – Animation SPDT Switch.

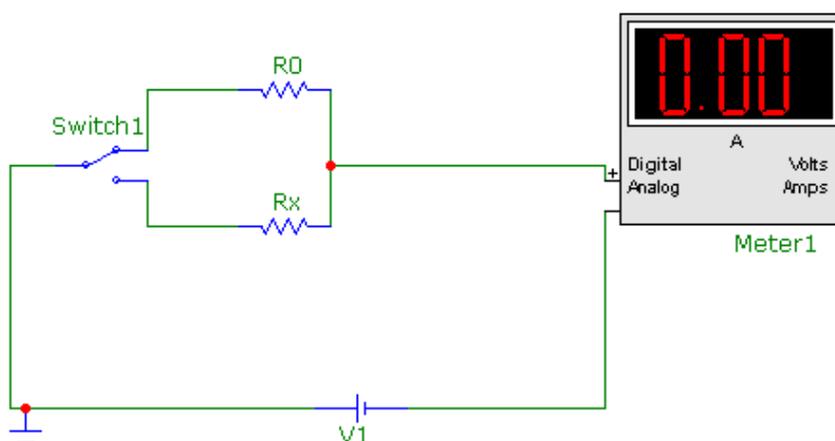


Рисунок 2.1 – Схема замены меры на измеряемую величину

Значения сопротивления R_0 и напряжения V_1 взять из таблицы 2.1. В элемент R_x занести *любое* значение сопротивления.

Таблица 2.1 – Исходные данные для исследования схемы замены меры

№ варианта	$V_1, В$	$R_1, Ом$
1	2	3
1	5	50
2	7	45
3	9	40
4	10	35
5	15	40
6	20	30

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
7	25	55
8	6	60
9	8	50
10	11	45
11	13	40
12	14	35
13	12	40
14	21	30
15	23	55
16	20	60
17	18	50
18	17	45
19	6	40
20	7	35
21	10	40
22	11	30
23	13	55
24	14	60
25	12	35

2.2 Изучить метод замены меры на измеряемую величину. На основании формул (1.1) – (1.3) вычислить величину сопротивления R_x . Убедиться в ее совпадении со значением, которое было занесено в схему.

2.3 Исследовать мостовую схему на постоянном токе для измерения сопротивления. Для этого собрать схему, изображенную на рисунке 2.2.

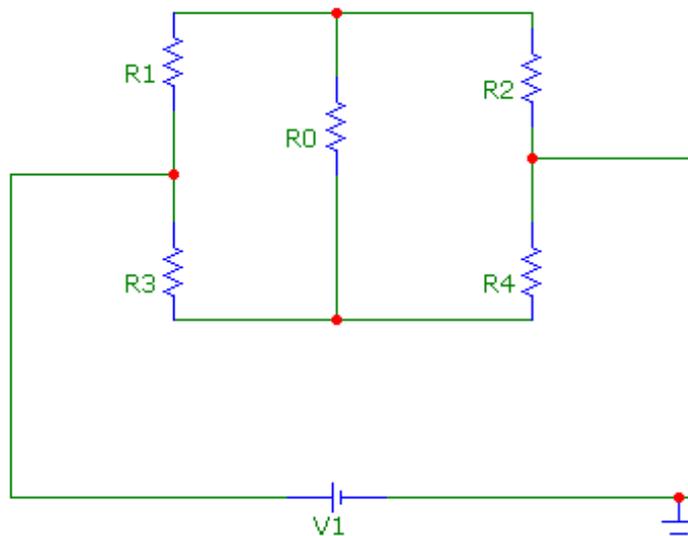


Рисунок 2.2 – Схема одинарного моста на постоянном токе

Величины напряжения $V1$ и сопротивлений $R2$ - $R4$ взять из таблицы 2.2. Величину $R0$ задать равной 1 Ом.

Таблица 2.2 – Исходные данные для исследования одинарного моста на постоянном токе

№ варианта	$V1, В$	$R2, Ом$	$R3, Ом$	$R4, Ом$
1	5	50	62	32
2	7	45	54	22
3	9	40	45	56
4	10	35	43	68
5	15	40	35	80
6	20	30	40	90
7	25	55	30	95
8	6	60	55	100
9	8	50	60	60
10	11	45	50	65
11	13	40	45	70
12	14	35	40	85
13	12	40	84	82
14	21	30	100	68
15	23	55	50	86
16	20	60	62	76
17	18	50	52	82
18	17	45	42	90

Продолжение таблицы 2.2

1	5	50	62	32
19	6	40	44	80
20	7	35	56	70
21	10	40	84	68
22	11	30	100	56
23	13	55	50	62
24	14	60	48	52
25	12	35	30	42

2.4 На основании условия уравнивания моста на постоянном токе (1.13) вычислить величину R_1 . Рассчитанное значение занести в схему в сопротивление R_1 .

2.5 Запустить схему и убедиться, что через сопротивление R_0 протекает ток I_0 , равный нулю. Для этого нажать Analysis – Transient. В столбце «Yexpression» записать $i(r_0)$.

2.6 Увеличить значение сопротивления R_1 в *десять раз*. Рассчитать величину тока I_0 по формуле (1.12). Сравнить её с полученным значением в программе MicroCap. Для этого нажать Analysis – Transient. В столбце «Yexpression» записать $i(r_0)$.

2.7 Вернуть исходное значение сопротивления R_1 . Увеличить значение сопротивления R_2 в *десять раз*. Рассчитать величину тока I_0 по формуле (1.12). Сравнить её с полученным значением в программе MicroCap. Для этого нажать Analysis – Transient. В столбце «Yexpression» записать $i(r_0)$.

2.8 Исследовать мостовую схему на переменном токе. Для этого собрать схему, изображенную на рисунке 2.3.

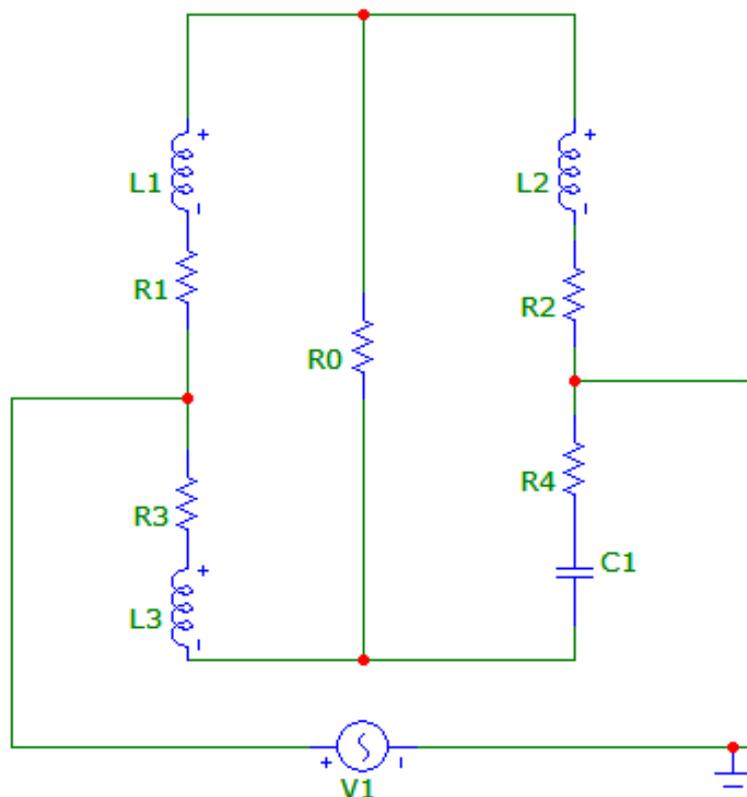


Рисунок 2.3 – Схема одинарного моста на переменном токе

В источник переменного напряжения $V1$ установить величину амплитуды 220В, частоты 50 Гц. Величины сопротивлений $R2$ - $R4$ взять из таблицы 2.2. Величину $R0$ задать равной 1 Ом. Величину $R1$ задать равной значению, рассчитанному в пункте 2.4. Значения катушек индуктивностей $L1$ - $L3$ и конденсатора $C1$ взять из таблицы 2.3.

Таблица 2.3 – Исходные данные для исследования одинарного моста на переменном токе

№	$L1$, Гн	$L2$, Гн	$L3$, Гн	$C1$, мкФ
1	2	3	4	5
1	0.5	1.3	0.62	320
2	0.7	1.4	0.54	220
3	0.9	1.2	0.5	560
4	0.2	2.1	0.7	680
5	0.35	0.5	0.9	800
6	0.4	0.7	0.2	900
7	0.3	0.9	0.35	950

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3	4	5
8	0.6	0.2	0.5	700
9	0.8	0.35	0.7	600
10	1.1	0.4	0.4	650
11	1.3	0.3	0.3	700
12	1.4	0.6	0.6	850
13	1.2	0.5	0.5	820
14	2.1	1.2	1.2	680
15	2.3	2.1	2.1	860
16	2.2	0.5	0.4	760
17	0.8	0.7	0.2	820
18	1.2	1.2	0.35	900
19	0.6	0.2	0.5	800
20	0.7	0.35	0.7	700
21	1	0.4	0.4	680
22	1.1	0.3	0.3	560
23	1.3	0.55	0.6	620
24	1.4	0.6	0.5	525
25	1.2	0.35	0.2	420

2.8 Рассчитать величину тока I_0 по формуле (1.4). Сравнить её с полученным значением в программе MicroCap. Для этого нажать Analysis – Transient. В столбце «Yexpression» записать $i(r0)$. Скопировать себе полученный график.

3 Контрольные вопросы

3.1 Назовите измерения методом сравнения с мерой.

3.2 В чем сущность нулевого метода сравнения с мерой?

3.3 В чем сущность дифференциального метода сравнения с мерой?

3.4 В чем разница между частотно-зависимым и частотно-независимым мостом?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы:

- изучить принцип действия термоэлектрических измерительных преобразователей температуры;
- исследовать характеристики термоэлектрических измерительных преобразователей.

1 Теоретическое введение

Термоэлектрические измерительные преобразователи (ИП) представляют собой приборы, которые имеют в роли чувствительных элементов термопары, которые, в свою очередь, состоят из двух разнородных проводников. На одном конце они соединены, что позволяет использовать это устройство в качестве прибора с термоэлектрическим эффектом для измерения температуры.

Принцип действия термоэлектрических ИП основан на эффекте Зеебека. При соединении двух (или более) разнородных проводников или полупроводников концами при различной температуре концов ($T_0 \neq T_1$) в цепи возникает термоэлектродвижущая сила E_T (термо-ЭДС) (рисунок 1.1,а).

Термо-ЭДС является функцией разности температур спаев:

$$E_T = E_{AB}(T_X) + E_{BA}(T_0) = E_{AB}(T_X) - E_{AB}(T_0) = E_{AB}(T_X - T_0)$$

Таким образом, термо-ЭДС находится в зависимости от таких факторов, как:

- материал проводников;
- температура спаев.

В простейшем случае, когда цепь состоит из двух проводников или полупроводников, она называется термоэлектрическим преобразователем, или термопарой.

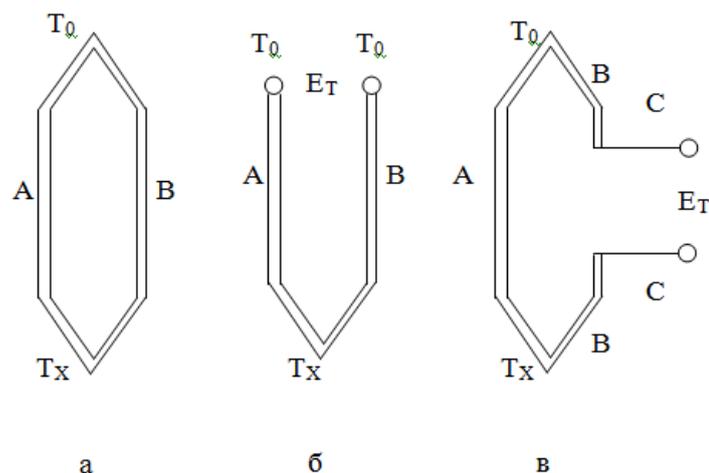


Рисунок 1.1 – Принцип действия термоэлектрических преобразователей

Проводники или полупроводники, составляющие термопару, называются термоэлектродами, а их соединения – спаями. Спай термопары, воспринимающий измеряемую температуру T_x , называется рабочим (горячим) спаем. Второго спая обычно нет, а есть два так называемых «свободных» конца (рисунок 1.1,б), с которых снимается термо-ЭДС E_T . Температура свободных концов – T_0 .

Практическое использование термопар основывается на трех основных законах, которые устанавливают правила их подключения.

Согласно первому закону явление термоэлектричества характерно только для неоднородных электрических цепей. Соединение двух разных проводников или полупроводников обеспечивает возникновение термо-ЭДС (рисунок 1.1,а), значение которой является функцией температур ее спаев и не зависит от других точек термопары.

Согласно второму закону алгебраическая сумма всех термо-ЭДС цепи, состоящей из любого количества термопар, будет всегда равна нулю, если все соединения находятся при одинаковой температуре. При включении в цепь термопары третьего проводника С, концы которого находятся при одинаковых температурах T_1 , ЭДС в цепи не изменяется (рисунок 1.1,в).

Отсюда следует, что термоэлектрический контур можно разомкнуть в любом месте и включить в него дополнительные проводники, и если их дополнительные соединения будут при одинаковой температуре, то дополнительных термо-ЭДС не возникнет:

$$E_T = E_{AB}(T_X) + E_{BC}(T_{\nu 1}) + E_{CB}(T_{\nu 1}) = E_{AB}(T_X) - E_{AB}(T_0)$$

Таким образом, прибор для измерения термо-ЭДС может быть включен как в разрыв, так и между концами термопары. Из этого закона также следует, что термоэлектрические соединения могут выполняться любым способом: сваркой, пайкой, скруткой и т.д.

Согласно третьему закону, если два соединения разных материалов, находящихся при температурах спаев T_X и T_1 вырабатывают термо-ЭДС E_1 , а при температурах T_1 и T_0 – термо-ЭДС E_2 , то при температурах T_X и T_0 выходная ЭДС E_T будет равна алгебраической сумме двух ЭДС E_1 и E_2 , т.е. $E_T = E_1 + E_2$.

Этот закон позволяет градуировать термопары в одном температурном диапазоне, а использовать в другом.

2 Выполнение работы

2.1. Изучить принцип действия термоэлектрических измерительных преобразователей (ИП) и их основные характеристики.

2.2. Исследовать статическую характеристику преобразования термоэлектрического ИП.

2.3. Изучить погрешности термоэлектрических ИП и методы их уменьшения.

2.4. Исследовать погрешности термоэлектрических ИП, обусловленные отклонением температуры свободных концов термопары от градуировочного значения и изменением сопротивления элементов измерительной цепи.

2.5. В ходе проведения опыта измерения температуры с помощью термопар хромель-копель ХК(L) и хромель-алюмель ХА(K), подключенный к

ним вольтметр для измерения термо-ЭДС показал *текущие* (E_t) результаты, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений напряжения при изменении температуры

Вариант	$T, ^\circ\text{C}$	30	50	100	150	200	250	300
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,41	2,01	6,01	9,51	13,51	18,01	22,01
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	0,901	1,81	3,71	5,71	7,91	9,91	12,01
2	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,42	2,02	6,02	9,52	13,52	18,02	22,02
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	0,92	1,82	3,72	5,72	7,92	9,92	12,02
3	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,43	2,03	6,03	9,53	13,53	18,03	22,03
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	0,93	1,83	3,73	5,73	7,93	9,93	12,03
4	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,44	2,04	6,04	9,54	13,54	18,04	22,04
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	0,94	1,84	3,74	5,74	7,94	9,94	12,04
5	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,45	2,05	6,05	9,55	13,55	18,05	22,05
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	0,95	1,85	3,75	5,75	7,95	9,95	12,05
6	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,46	2,06	6,06	9,56	13,56	18,06	22,06
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	0,96	1,86	3,76	5,76	7,96	9,96	12,06
7	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,47	2,07	6,07	9,57	13,57	18,07	22,07
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	0,97	1,87	3,77	5,77	7,97	9,97	12,07
8	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,48	2,08	6,08	9,58	13,58	18,08	22,08
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	0,98	1,88	3,78	5,78	7,98	9,98	12,08
9	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,49	2,09	6,09	9,59	13,59	18,09	22,09
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	0,99	1,89	3,79	5,79	7,99	9,99	12,09
10	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,5	2,1	6,1	9,6	13,6	18,1	22,1
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	1	1,9	3,8	5,8	8	10	12,1
11	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,51	2,11	6,11	9,61	13,61	18,11	22,11
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	1,01	1,91	3,81	5,81	8,01	10,01	12,11
12	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,52	2,12	6,12	9,62	13,62	18,12	22,12
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	1,02	1,92	3,82	5,82	8,02	10,02	12,12
13	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,53	2,13	6,13	9,63	13,63	18,13	22,13
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	1,03	1,93	3,83	5,83	8,03	10,03	12,13
14	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,54	2,14	6,14	9,64	13,64	18,14	22,14
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	1,04	1,94	3,84	5,84	8,04	10,04	12,14
15	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,55	2,15	6,15	9,65	13,65	18,15	22,15
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	1,05	1,95	3,85	5,85	8,05	10,05	12,15
16	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,56	2,16	6,16	9,66	13,66	18,16	22,16
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	1,06	1,96	3,86	5,86	8,06	10,06	12,16
17	$E_{T(L)}, \text{мВ}$	0,57	2,17	6,17	9,67	13,67	18,17	22,17
	$E_{T(K)}, \text{мВ}$	1,07	1,97	3,87	5,87	8,07	10,07	12,17

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
18	$E_{T(L)}$, мВ	0,58	2,18	6,18	9,68	13,68	18,18	22,18
	$E_{T(K)}$, мВ	1,08	1,98	3,88	5,88	8,08	10,08	12,18
19	$E_{T(L)}$, мВ	0,59	2,19	6,19	9,69	13,69	18,19	22,19
	$E_{T(K)}$, мВ	1,09	1,99	3,89	5,89	8,09	10,09	12,19
20	$E_{T(L)}$, мВ	0,6	2,2	6,2	9,7	13,7	18,2	22,2
	$E_{T(K)}$, мВ	1,1	2	3,9	5,9	8,1	10,1	12,2
21	$E_{T(L)}$, мВ	0,61	2,21	6,21	9,71	13,71	18,21	22,21
	$E_{T(K)}$, мВ	1,11	2,01	3,91	5,91	8,11	10,11	12,21
22	$E_{T(L)}$, мВ	0,62	2,22	6,22	9,72	13,72	18,22	22,22
	$E_{T(K)}$, мВ	1,12	2,02	3,92	5,92	8,12	10,12	12,22
23	$E_{T(L)}$, мВ	0,63	2,23	6,23	9,73	13,73	18,23	22,23
	$E_{T(K)}$, мВ	1,13	2,03	3,93	5,93	8,13	10,13	12,23
24	$E_{T(L)}$, мВ	0,64	2,24	6,24	9,74	13,74	18,24	22,24
	$E_{T(K)}$, мВ	1,14	2,04	3,94	5,94	8,14	10,14	12,24
25	$E_{T(L)}$, мВ	0,65	2,25	6,25	9,75	13,75	18,25	22,25
	$E_{T(K)}$, мВ	1,15	2,05	3,95	5,95	8,15	10,15	12,25

В таблице 2.2. представлены *номинальные* (E_n) статические характеристики преобразования термопар.

Таблица 2.2 – Характеристика преобразования термопар

$T, ^\circ\text{C}$	30	50	100	150	200	250	300
$E_{H(L)}$, мВ	1,95	3,29	6,84	10,59	14,52	18,61	22,81
$E_{H(K)}$, мВ	1,20	2,02	4,11	6,14	8,16	10,15	12,21

2.6 На основании данных из таблицы 2.1 построить в различных координатных плоскостях в Excel статические характеристики преобразования термопары, $E_{T(L)}=f(T)$ и $E_{T(K)}=f(T)$.

2.7 Определить погрешность линейности статических характеристик. Для нахождения погрешности линейности γ_L необходимо аппроксимировать характеристику преобразования прямой линией. Для этого нажать на построенный график правой кнопкой.

Выбрать «Добавить линию тренда». В появившемся диалоговом окне в разделе «Построение линии тренда» указать «Линейная».

В нижней части диалогового окна отметить галочку напротив надписи «Показывать уравнение на диаграмме» (рисунок 2.1).

В результате на графике появится уравнение вида $y=a_1x\pm a_2$. Найти максимальное отклонение Δ_L рассчитанной прямой от кривой $E_{T(L)}=f(T)$.

Аналогичные действия проделать для кривой $E_{T(K)}=f(T)$.

Погрешность линейности определяется по формуле:

$$\gamma_L = \frac{\Delta_L}{E_{T_k} - E_{T_n}} \cdot 100\% ,$$

где E_{T_k} и E_{T_n} - значения термо-ЭДС при начальном и конечном значениях температуры, т.е. при 30°C и 300°C .

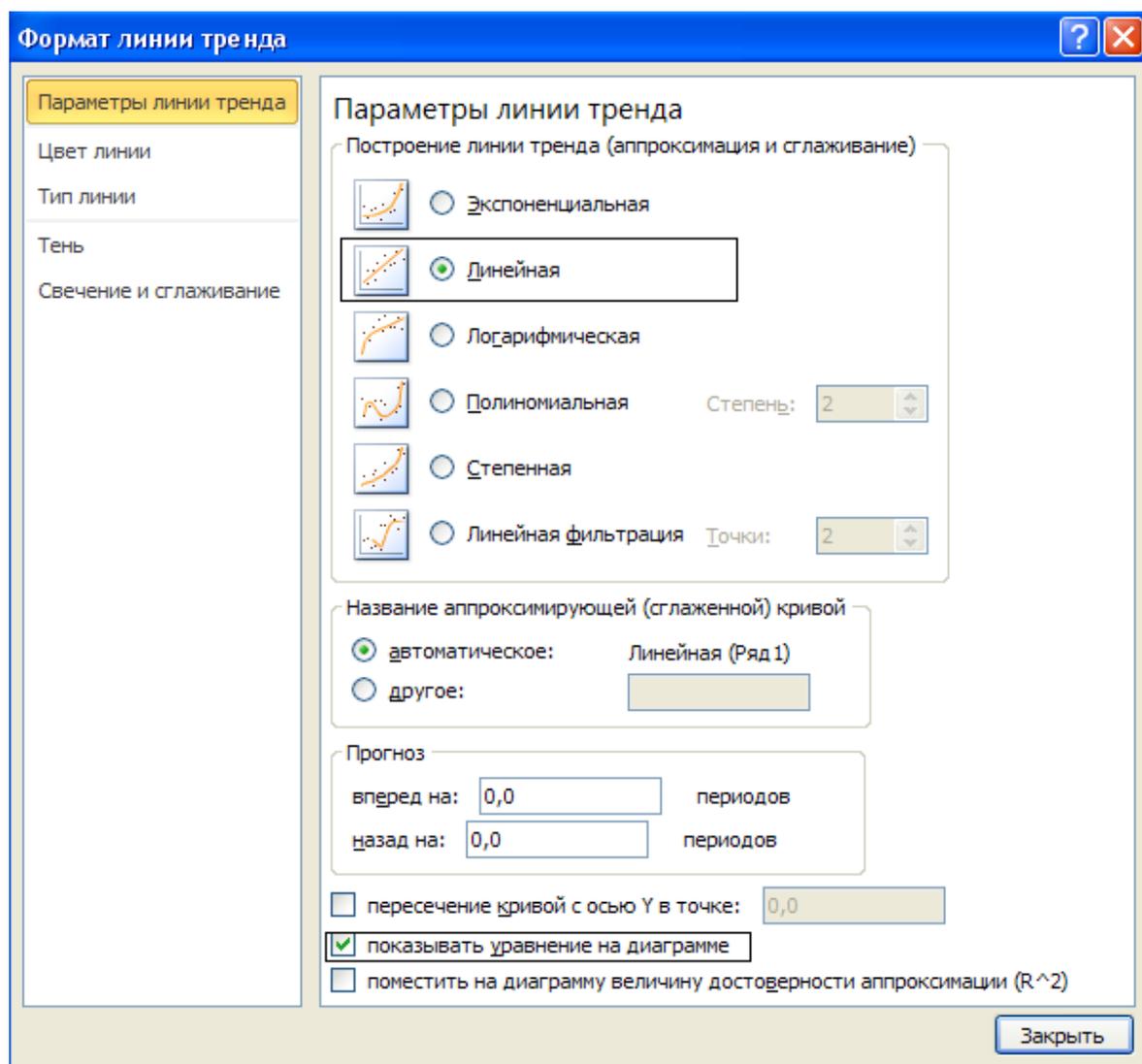


Рисунок 2.1 – Настройка аппроксимации графиков $E_{T(L)}=f(T)$ и $E_{T(K)}=f(T)$.

2.8 Определить погрешность, обусловленную отклонением текущей характеристики от номинальной характеристики преобразования:

$$\Delta E_i = E_{H_i} - E_{T_i}$$

Затем определить погрешность по формуле:

$$\gamma_{Л} = \frac{\Delta E_{max}}{E_{H_{max}}} \cdot 100\%$$

В результате, данные расчётов для термопары хромель-копель ХК(Л) занести в таблицу 2.3. Данные расчетов для термопары хромель-алюмель ХА(К), занести в таблицу 2.4.

Таблица 2.3 – Результаты измерений и расчётов для термопары хромель-копель ХК(Л).

T, °C	30	50	100	150	200	250	300
E _{T(L)} , мВ							
E _{H(L)} , мВ	1,95	3,29	6,84	10,59	14,52	18,61	22,81
ΔE, мВ							
γ, %							

Таблица 2.4 – Результаты измерений и расчётов для термопары хромель-алюмель ХА(К).

T, °C	30	50	100	150	200	250	300
E _{T(K)} , мВ							
E _{H(K)} , мВ	1,20	2,02	4,11	6,14	8,16	10,15	12,21
ΔE, мВ							
γ, %							

2.9 Определить погрешность, обусловленную влиянием сопротивления соединительных проводов и сопротивления вольтметра. Для этого в цепь вольтметра был включен резистор и проведены измерение напряжения термопары U_{R(L)} и U_{R(K)} для трёх значений температуры (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Измерения напряжения при включении в цепь дополнительного сопротивления

Вариант	$T, ^\circ\text{C}$	100	200	300
1	2	3	4	5
1	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,11	12,51	20,01
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,51	7,01	10,01
2	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,12	12,52	20,02
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,52	7,02	10,02
3	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,13	12,53	20,03
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,53	7,03	10,03
4	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,14	12,54	20,04
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,54	7,04	10,04
5	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,15	12,55	20,05
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,55	7,05	10,05
6	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,16	12,56	20,06
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,56	7,06	10,06
7	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,17	12,57	20,07
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,57	7,07	10,07
8	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,18	12,58	20,08
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,58	7,08	10,08
9	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,19	12,59	20,09
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,59	7,09	10,09
10	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,2	12,6	20,1
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,6	7,1	10,1
11	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,21	12,61	20,11
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,61	7,11	10,11
12	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,22	12,62	20,12
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,62	7,12	10,12
13	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,23	12,63	20,13
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,63	7,13	10,13
14	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,24	12,64	20,14
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,64	7,14	10,14
15	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,25	12,65	20,15
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,65	7,15	10,15
16	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,26	12,66	20,16
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,66	7,16	10,16
17	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,27	12,67	20,17
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,67	7,17	10,17
18	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,28	12,68	20,18
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,68	7,18	10,18
19	$U_{R(L)}, \text{MB}$	5,29	12,69	20,19
	$U_{R(K)}, \text{MB}$	3,69	7,19	10,19

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3	4	5
20	U _{R(L)} , мВ	5,3	12,7	20,2
	U _{R(K)} , мВ	3,7	7,2	10,2
21	U _{R(L)} , мВ	5,31	12,71	20,21
	U _{R(K)} , мВ	3,71	7,21	10,21
22	U _{R(L)} , мВ	5,32	12,72	20,22
	U _{R(K)} , мВ	3,72	7,22	10,22
23	U _{R(L)} , мВ	5,33	12,73	20,23
	U _{R(K)} , мВ	3,73	7,23	10,23
24	U _{R(L)} , мВ	5,34	12,74	20,24
	U _{R(K)} , мВ	3,74	7,24	10,24
25	U _{R(L)} , мВ	5,35	12,75	20,25
	U _{R(K)} , мВ	3,75	7,25	10,25

По формуле:

$$\delta_R = \frac{\Delta_T}{E_T} \cdot 100\% = \frac{E_T - U_R}{E_T} \cdot 100\%,$$

Где E_T – текущие значения термо-ЭДС;

U_R – величина напряжения при включении в цепь дополнительного сопротивления

рассчитать погрешность, обусловленную сопротивлением соединительных проводов. Результаты расчётов для термопары хромель-копель ХК(L) занести в таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты измерений и расчётов для термопары хромель-копель ХК(L).

T, °C	100	200	300
E _{T(L)} , мВ			
U _{R(L)} , мВ			
δ _R , %			

Рассчитанные значения для термопары хромель-алюмель ХА(K), занести в таблицу 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты измерений и расчётов для термопары хромель-алюмель ХА(К).

$T, ^\circ\text{C}$	100	200	300
$E_{T(K)}, \text{мВ}$			
$U_{R(K)}, \text{мВ}$			
$\delta_R, \%$			

2.10. Сделать выводы по работе

3 Контрольные вопросы

3.1 В чем заключается эффект Зеебека?

3.2 В чем заключается принцип работы термоэлектрического преобразователя

3.3 Как записывается уравнение преобразования термоэлектрического преобразователя?

3.4 Перечислите известные материалы для изготовления термоэлектрического преобразователя.

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ "МЕТРОЛОГИЯ"

1 При определении твердости материала используется шкала...

1. порядка
2. отношений
3. интервалов
4. абсолютная

2 Упорядоченная совокупность значений физической величины, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений называется ...

1. результатами вспомогательных измерений
2. шкалой физической величины
3. единицей измерения
4. выборкой результатов измерений

3 Коэффициент полезного действия определяется по шкале ...

1. отношений
2. абсолютной
3. наименований
4. порядка

4 Свойство, общее в качественном отношении для множества объектов, но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них, называется ...

1. размером физической величины
2. размерностью физической величины
3. физической величиной
4. фактором

5 Упорядоченная последовательность значений физической величины, принятая по результатам точных измерений, называется ...

1. ценой деления шкалы
2. шкалой физической величины
3. шкалой средства измерений
4. пределом измерения

6 Основными единицами системы физических величин являются ...

1. ватт
2. метр
3. килограмм
4. джоуль

7 По международной системе единиц физических величин сила измеряется ...

1. м/с
- 2.
3. рад/с
4. Ньютон

8 Приставками SI для обозначения увеличения значений физических величин являются ...

1. кило
2. санти
3. мега
4. микро

9 Приставками SI для обозначения уменьшающих значений физических величин являются ...

1. деци

2. санти
3. кило
4. гекто

10 В определение «измерение» не входит следующее утверждение:

1. нахождение соотношения измеряемой величины с ее единицей
2. результаты выражаются в узаконенных единицах
3. с применением технического средства, хранящего единицу физической величины
4. это совокупность операций по определению физической величины

11 Если результаты измерений изменяющейся во времени величины сопровождаются указанием моментов измерений, то измерения называют...

1. статистическими
2. динамическими
3. многократными
4. совокупными

12 Выражение $Q = q [Q]$, где $[Q]$ – единица измерения, q – числовое значение, является...

1. математической моделью измерений
2. линейным преобразованием
3. основным постулатом метрологии
4. основным уравнением измерений по шкале отношений

13 По способу получения информации измерения разделяют...

1. однократные и многократные
2. статические и динамические
3. прямые, косвенные, совокупные и совместные

4. абсолютные и относительные

14 Метод непосредственной оценки имеет следующее достоинство:

1. дает возможность выполнять измерения величины в широком диапазоне без перенастройки
2. эффективен при контроле в массовом производстве
3. сравнительно небольшую инструментальную составляющую погрешности измерений
4. обеспечивает высокую чувствительность

15 По метрологическому назначению средства измерений делятся на ...

1. основные
2. эталоны
3. рабочие
4. дополнительные

16 По способу выражения погрешности средств измерений могут быть ...

1. абсолютные
2. грубые
3. случайные
4. относительные

17 Классом точности называется обобщенная характеристика, выражаемая пределами допускаемых погрешностей ...

1. основной
2. систематической
3. дополнительной
4. случайной

18 Классы точности наносят на ...

1. указатели (стрелки)
2. корпуса средств измерений
3. стойки
4. циферблаты

19 Если пределы допускаемой основной погрешности выражены в форме абсолютной погрешности средств измерений, то класс точности обозначается ...

1. буквами арабского алфавита
2. малыми буквами римского алфавита
3. римскими цифрами
4. прописными буквами латинского алфавита

20 Классификация ... по характеристике точности, по числу измерений в ряду измерений, по отношению к изменению измеряемой величины, по выражению результата измерений, по общим приёмам получения результатов измерений?

1. метрологии;
2. методов;
3. эталонов;
4. измерения;

21 Главный нормативный акт по обеспечению единства измерений?

1. закон РФ;
2. правила РФ;
3. договор РФ;
4. конституция РФ;

22 Техническое устройство, предназначенное для измерений?

1. эталон измерения;
2. средство измерения;
3. единство измерения;
4. единица измерения;

23 Отклонение результата измерений от истинного значения измеряемой величины?

1. погрешность измерения;
2. средство измерения;
3. единство измерения;
4. эталон измерения;

24 Она бывает теоретическая, прикладная, законодательная?

1. методика;
2. история;
3. метрология;
4. величина;

25 Централизованное воспроизведение единиц осуществляется с помощью специальных технических средств, называемых ...?

1. измерениями;
2. погрешностями;
3. эталонами;
4. величинами;

26 Состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин, а погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью?

1. погрешность измерений;

2. средство измерений;
3. единство измерений;
4. точность измерений;

27 Его цель это получение значения этой величины в форме наиболее удобной для пользования?

1. измерения;
2. метрологии;
3. закона;
4. теории;

28 Наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности?

1. теория;
2. практика;
3. метрология;
4. стандартизация;

29 Эталоны, используемые для средств измерений масс?

1. весы;
2. гири;
3. камни;
4. бумага;

30 Эти свойства определяют область применения и качество измерений?

1. измерений;
2. метрологические;
3. методов;
4. объектов;

31 Основные объекты измерений?

1. постоянные величины;
2. показательные величины;
3. физические величины;
4. полученные величины;

32 Если коэффициент развертки осциллографа равен 10 мс, то частота сигнала равна...

1. 2,5 кГц
2. 2,5 МГц
3. 250 кГц
4. 25 кГц

33 Коэффициент амплитудной модуляции равен ...

1. 2%
2. 20%
3. 1,5%
4. 15%

34 Если коэффициент отклонения осциллографа равен 2 В/дел., то амплитуда сигнала равна...

1. 2 В
2. 1 В
3. 4 В
4. 6 В

35 Измерения с использованием метода совпадений осуществляют с помощью...

1. микрометра
2. манометра

3. профилометра
4. штангенциркуля

36 Измерения по методу непосредственной оценки реализуются в ...

1. фазометрах
2. штангенинструментах
3. микрометрах
4. амперметрах

37 По способу формирования выходного сигнала измерительные преобразователи делятся на...

1. параметрические
2. синусоидальные
3. дисперсионные
4. генераторные

38 По месту в структурной схеме измерительной цепи различают измерительные преобразователи ...

1. первичные
2. промежуточные
3. индикаторные
4. управляющие

39 Преобразование входной механической величины в выходную электрическую основано на физическом принципе...

1. доплеровского эффекта
2. пьезоэлектрического эффекта
3. эффекта Холла
4. пьезорезистивного эффекта

40 Число 10 в десятичной системе счисления соответствует число в двоичной ...

1. 1100
2. 1011
3. 1010
4. 0111

41 Двоичная форма записи числа 13 имеет вид ...

1. 1110
2. 1000
3. 1101
4. 0100

42 Измерительная система распознавания образов выполняет функции...

1. определения принадлежности объекта к одной из известных групп объектов
2. контроля технологических процессов
3. определения работоспособности элемента и локализации неисправности
4. получения максимального количества достоверной измерительной информации об объекте

43 Основным элементом автоматизированных систем с каналом общего пользования является ...

1. устройство воздействия на объект измерения
2. персональный компьютер
3. датчик
4. интерфейс

44 Совокупность нескольких измерительных систем представляет собой

1. метрологическую установку
2. информационно-вычислительный комплекс
3. рабочую станцию
4. компьютерно-измерительную систему

45 Использование автоматизированной системы контроля и управления сбором данных для выявления неисправностей называется ...

1. автоматической блокировкой
2. автоматическим регулированием
3. технической диагностикой
4. предельной защитой

46 Принцип резонансного метода измерения частоты основан на сравнении измеряемой частоты с частотой ...

1. счетных импульсов
2. колебательного контура
3. эталонного генератора
4. перезарядки конденсатора

47 При измерении амплитуды сигнала универсальным осциллографом плавная ручка переключателя «Время/дел.» должна быть в положении

1. любом
2. крайне левом
3. крайне правом
4. среднем

48 При подаче синусоидального сигнала 10 В на вольтметр среднеквадратических значений получили 8 В. Относительная погрешность вольтметра составляет ...

1. 12,5 %
2. 40 %
3. 14 %
4. 20 %

49 На вольтметр среднеквадратических значений подали прямоугольный сигнал амплитудой 10 В, частотой 1 Гц и длительностью 0,04 С. Вольтметр должен показать...

1. 0,4 В
2. 2 В
3. 10 В
4. 7 В

50 На вход осциллографа подан синусоидальный сигнал. Если развертка отключена, то на его экране будет ...

1. ничего не будет
2. горизонтальная линия
3. вертикальная линия
4. бегущая синусоида

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шабалдин Е.Д., Метрология и электрические измерения: Учеб.пособие /Е.Д. Шабалдин, Г.К. Смолин, В.И. Уткин, А.П. Зарубин; Под ред.Е.Д. Шабалдина. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос.гос. проф.-пед. ун-т», 2006. 282 с.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учеб.для вузов. -9-е изд., стер. - М.: Изд. центр «Академия», 2005. 544 с.
3. Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. Основы метрологии. - М.: Изд-во стандартов, 1998. 336 с.

Приложение А

Таблица распределения Стьюдента

Число степеней свободы $f = n - 1$	n	Доверительная вероятность			
		0.90	0.95	0.99	0.999
1	2	6.3137515148	12.706204736	63.656741162	636.61924943
2	3	2.9199855803	4.3026527299	9.9248432009	31.599054577
3	4	2.3533634348	3.1824463052	5.8409092997	12.923978636
4	5	2.1318467813	2.7764451052	4.6040948714	8.6103058138
5	6	2.0150483726	2.5705818366	4.0321429835	6.8688266398
6	7	1.9431802803	2.4469118487	3.7074280213	5.9588617993
7	8	1.8945760506	2.3646242510	3.4994832973	5.4078825209
8	9	1.8595480375	2.3060041350	3.3553873313	5.0413054333
9	10	1.8331293265	2.2621571627	3.2498355440	4.7809125859
10	11	1.8124611228	2.2281388519	3.1692726671	4.5868938587
11	12	1.7958848187	2.2009851600	3.1058065132	4.4369793382
12	13	1.7822875556	2.1788128296	3.0545395883	4.3177912836
13	14	1.7709333959	2.1603865646	3.0122758382	4.2208317277
14	15	1.7613101357	2.1447866879	2.9768427341	4.1405411274
15	16	1.7530503556	2.1314495455	2.9467288334	4.0727651959
16	17	1.7458836762	2.1199052992	2.9207816223	4.0149963326
17	18	1.7396067260	2.1098557783	2.8982305196	3.9651262636
18	19	1.7340636066	2.1009220402	2.8784404727	3.9216458200
19	20	1.7291328115	2.0930240544	2.8609346064	3.8834058494
20	21	1.7247182429	2.0859634472	2.8453397097	3.8495162729
21	22	1.7207429028	2.0796138447	2.8313595580	3.8192771630
22	23	1.7171443743	2.0738730679	2.8187560606	3.7921306708
23	24	1.7138715277	2.0686576104	2.8073356837	3.7676268037
24	25	1.7108820799	2.0638985616	2.7969395047	3.7453986189
25	26	1.7081407612	2.0595385527	2.7874358136	3.7251439494
26	27	1.7056179197	2.0555294386	2.7787145333	3.7066117433
27	28	1.7032884457	2.0518305164	2.7706829571	3.6895917133
28	29	1.7011309342	2.0484071418	2.7632624554	3.6739064006
29	30	1.6991270265	2.0452296421	2.7563859036	3.6594050194
30	31	1.69726089436	2.0422724563	2.7499956535	3.645958635
40	41	1.6838510113	2.021075383	2.7044592674	3.5509657608
60	61	1.6706488646	2.0002978210	2.66028303115	3.4602004692
120	121	1.6576508993	1.9799304050	2.6174114477	3.37345376507
999999.0	1000000.0	1.6448551507	1.9599663568	2.5758322011	3.2905646126

ЛИЦИН КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ
МАЖИРИНА РАИСА ЕВГЕНЬЕВНА

МЕТРОЛОГИЯ

Лабораторный практикум

для студентов направлений подготовки
13.03.02 "Электроэнергетика и электротехника",
15.03.02 "Технологические машины и оборудование",
13.03.01 "Теплоэнергетика и теплотехника",
всех форм обучения

Подписано в печать 23.11.2017 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег.№ 100	Печать цифровая Тираж 100 экз.	Уч.-изд.л. 4,625

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: nfmisis@yandex.ru

Контактный тел. 8 (3537) 679729.