



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
**ИНСТИТУТ ТЕХНОЛОГИЙ (ФИЛИАЛ) ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
В Г. ВОЛГОДОНСКЕ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

**(Институт технологий (филиал) ДГТУ в г. Волгодонске)**



**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор  
И.В. Столяр  
«26» апреля 2022 г.

**Лабораторный практикум**

**по дисциплине**

**«Физика»**

**для обучающихся по направлению подготовки**

**15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных**

**производств**

**профиль Технология машиностроения**

**2022 года набора**

Волгодонск  
2022

## **Лист согласования**

Методические указания по дисциплине «Физика» составлены в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки (специальности)

15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

Рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «ТСИИТ» протокол № 9

от «26» апреля 2022 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ И ПОРЯДОК ЕГО ВЫПОЛНЕНИЯ.....</b>	<b>5</b>
<b>ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....</b>	<b>6</b>
<b>ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>8</b>
<b>ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>9</b>
<b>ЗАПИСЬ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>10</b>
<b>ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ.....</b>	<b>10</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.....</b>	<b>12</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.....</b>	<b>18</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.....</b>	<b>25</b>
<b>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.....</b>	<b>32</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>41</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель настоящего учебно-методического пособия – оказать помощь студентам в изучении курса физики.

Лабораторный практикум по физике помогает глубже осознать и усвоить физические закономерности, приобрести навыки самостоятельной экспериментальной работы, ознакомиться с измерительной аппаратурой и методами физических измерений, научиться записывать и обрабатывать результаты измерений.

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ И ПОРЯДОК ЕГО ВЫПОЛНЕНИЯ

Лабораторный физический практикум представляет собой совокупность лабораторных работ, которые студент выполняет на лабораторных занятиях.

Каждое лабораторное занятие должно включать следующие этапы:

1. Подготовка к лабораторной работе:
  - а) необходимо составить бланк отчета по работе;
  - б) написать в рабочей тетради ответы на вопросы для самоконтроля.
2. Получение допуска к лабораторной работе.
3. Проведение эксперимента.
4. Обработка результатов эксперимента.
5. Сдача зачета по теории и оформленного отчета о лабораторной работе.

Вначале лабораторного занятия студент должен получить допуск к лабораторной работе. Для этого студенту необходимо знать цель работы, описание установки, измеряемые величины и представить преподавателю заготовленный бланк отчёта. Преподаватель на титульном листе бланка отчёта ставит подпись в графе «К работе допущен».

После получения допуска студент выполняет необходимые измерения. Преподаватель проверяет их и если измерения верны, ставит подпись в графе «Работа выполнена».

Далее студент обрабатывает результаты эксперимента (делает необходимые расчеты, строит графики).

Затем преподаватель проверяет в рабочей тетради письменные ответы на вопросы для самоконтроля, проводит теоретический опрос студента и при положительных ответах ставит подпись в графе «Теория зачтена».

После проверки полностью оформленного бланка отчета о лабораторной работе, на титульном листе которого должно стоять три подписи преподавателя с расшифровкой и датой проставления подписи, бланк сдается преподавателю и он проставляет в своем журнале, что данная лабораторная работа студентом зачтена.

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Схема установки.
5. Расчетные формулы.
6. Результаты измерений.
7. Расчеты, графики.
8. Выводы.

## **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

Физика исследует различные закономерные связи в природе. Закономерные связи между наблюдаемыми явлениями формулируются в виде физических законов, которые, как правило, записываются в виде равенств, связывающих различные физические величины.

Физическая величина является одним из основных понятий в физике. Данное понятие включает в себя свойство или совокупность свойств данного объекта, явления, процесса, которые могут быть измерены экспериментально.

Значение физической величины задается как определенное число принятых для нее единиц измерения и находится опытным путем с помощью специальных технических средств – измерительных приборов.

Результат измерения физической величины состоит из двух частей: численного значения и единиц измерения. Например, 5,2 м; 9,81 м/с<sup>2</sup>.

По способу получения числового значения физической величины различают прямые и косвенные измерения. При прямом измерении значение физической величины отсчитывают по показаниям средства измерения (измерение промежутка времени – секундомером, температуры – термометром, длины – масштабной линейкой и т.д.). Однако прямые измерения не всегда возможны. При косвенном измерении значение физической величины находят по известной зависимости между ней и непосредственно измеренными величинами (например, нахождение

плотности тела по его массе и объему).

Любая физическая величина обладает истинным значением, т.е. значением, идеально отражающим в качественном и количественном отношениях соответствующие свойства объекта.

Как правило, при любых измерениях получают не истинное значение измеряемой величины, а лишь ее приближенное значение. Это происходит в силу ряда объективных (несовершенство измерительной аппаратуры, неполнота знаний о наблюдаемом явлении) и субъективных причин (несовершенство органов чувств экспериментатора). Точные измерения можно произвести только в том случае, если исследуемая величина имеет дискретный характер: число атомов в молекуле; число электронов в атоме.

Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называется погрешностью измерения. По форме выражения различают абсолютные и относительные погрешности.

Абсолютная погрешность измерения – есть разность между результатом наблюдения и истинным значением измеряемой величины:  $\Delta a = a_i - a_0$ . Она выражается в единицах физической величины.

Относительная погрешность измерения – это сопоставление величины погрешности с самой измеряемой величиной:

$$\frac{\Delta a}{a_0} \cdot 100\%.$$

Значение физической величины, найденное экспериментально и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него, называется действительным значением физической величины.

При ограниченном числе измерений в качестве действительного значения может использоваться среднее арифметическое  $\langle a \rangle$ , вычисленное из серии результатов наблюдения, полученных с

$$\langle a \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N a_i}{N}.$$

одинаковой точностью: . Поэтому в качестве абсолютной погрешности

наблюдения используют величину:  $\Delta a = a_i - \langle a \rangle$ , а в качестве относительной

погрешности 
$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \cdot 100\%.$$

Оценить погрешность измеряемой величины, значит указать интервал  $(\langle a \rangle - \Delta a; \langle a \rangle + \Delta a)$  внутри которого с заданной вероятностью  $P$  заключено истинное значение измеряемой величины. Такой интервал называется доверительным. При многократных измерениях доверительную вероятность принимают равной  $P=0,95$ .

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

### 1. Дискретные величины.

Если измеряемая величина имеет дискретный характер, например, число атомов в молекуле; число электронов в атоме, то ее абсолютная погрешность равна нулю:  $\Delta a = 0$ .

### 2. Постоянные величины.

Если величина берется из таблиц или для данной лабораторной работы приведена на установке, как измеренная раньше, то абсолютная погрешность принимается равной половине единицы разряда последней значащей цифры взятого числа.

Например: для значения ускорения свободного падения

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ , взятого из таблицы, абсолютная погрешность

$\Delta g = 0,005 \text{ м/с}^2$ ; для значения гравитационной постоянной

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$  абсолютная погрешность

$\Delta G = 0,005 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ .

### 3. Измеряемые величины.

Абсолютная погрешность измеряемых в лабораторной работе величин определяется по прибору.

а) При использовании грубых приборов абсолютная погрешность равна половине



$$\lambda = \frac{1}{2} \text{ц.д.}$$

цены деления шкалы прибора:

2

б) При использовании приборов, содержащих дополнительную уточняющую шкалу нониуса, абсолютная погрешность берется равной цене деления шкалы нониуса:  $\lambda = \text{ц.д.}$

в) При использовании электроизмерительных приборов абсолютная

$$\lambda = \frac{\gamma \cdot A}{100}$$

погрешность рассчитывается по формуле: где  $\gamma$  - класс точности прибора,  $A$  - предел измерения.

Существует 8 классов точности приборов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5, 2,5, 4,0, поэтому  $\gamma$  может принимать одно из перечисленных значений.

Предел измерения  $A$  означает: для приборов с односторонней шкалой - верхний предел измерения; для приборов с двухсторонней шкалой – сумма пределов измерений по левой и правой частям шкалы.

4. Величина, определяемая из графика.

Абсолютная погрешность величины, взятой из графика, также находится из графика как изменение ординаты, вызванное изменением абсциссы на  $\Delta a$ :

$$\Delta f(a) = f(a + \Delta a) - f(a).$$

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

При косвенных измерениях искомая величина является функцией одного или нескольких аргументов:  $U = f(a, b, c, \dots)$ .

Величины  $a, b, c, \dots$  находятся непосредственно из эксперимента.

Сначала находят среднее значение и абсолютную погрешность каждого аргумента. Затем рассчитывают среднее значение искомой величины:

$$\langle U \rangle = f(\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle, \dots).$$

Величину абсолютной погрешности вычисляют по формуле:

$$\Delta U = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \Delta c\right)^2 + \dots}$$

Запишем эту формулу для нескольких частных случаев:

$$\text{а) } U = a \pm b \pm c \pm \dots \quad \Delta U = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta c^2 + \dots}$$

$$\text{б) } U = a^k b^l c^m \quad \Delta U = \langle U \rangle \sqrt{\left(\frac{k\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{l\Delta b}{\langle b \rangle}\right)^2 + \left(\frac{m\Delta c}{\langle c \rangle}\right)^2}.$$

В лабораторных работах приведены формулы для расчета абсолютных погрешностей искомых функций.

### ЗАПИСЬ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЙ

Окончательный результат измерения должен быть представлен в стандартной форме записи. Для этого:

- 1) абсолютную погрешность измерения округляют до первой значащей цифры;
- 2) результат измерения округляют до того разряда, до которого округлена абсолютная погрешность;
- 3) результат измерения должен содержать до запятой однозначную цифру.

Например:

$$\Delta a = 0,000381 \approx 0,0004 \text{ м};$$

$$\langle a \rangle = 0,06243 \approx 0,0624 \text{ м};$$

$$a = (\langle a \rangle \pm \Delta a) = (6,24 \pm 0,04) \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

### ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ

1. Графики нужно строить на миллиметровой бумаге.
2. При построении графика следует заранее выбрать масштаб, нанести деления масштаба по осям координат. Значения независимого аргумента откладываются на оси абсцисс, а по оси ординат откладываются значения функции.
3. По координатным осям необходимо указать не только откладываемые величины, но и единицы измерения.
4. При выборе масштаба надо стремиться к тому, чтобы кривая занимала весь лист. Шкала для каждой переменной может начинаться не с нуля, а с наименьшего

округленного значения и кончатся наибольшим.

5. После этого нанести на график экспериментальные точки. Экспериментальные точки соединяют между собой карандашом плавной кривой, без резких искривлений и углов.
6. Кривая должна охватывать возможно больше точек или проходить между ними так, чтобы по обе стороны от нее точки располагались равномерно.

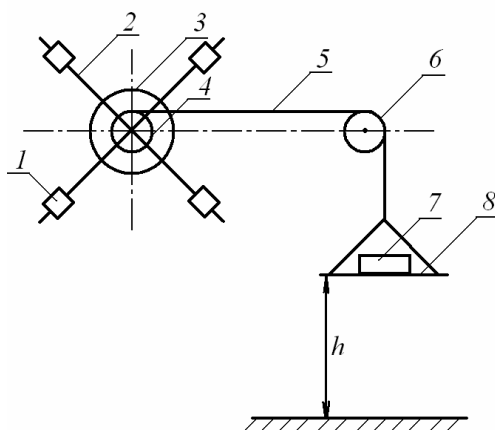
## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ИЗУЧЕНИЕ КИНЕМАТИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЙ ТВЕРДОГО ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

**Цель работы:** изучить поступательное и вращательное движение; определить кинематические характеристики тел, движущихся поступательно и вращающихся относительно неподвижной оси.

**Приборы и принадлежности:** маятник Обербека, секундомер, штангенциркуль, набор грузов.

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ Маятник Обербека (рис.1) представляет собой маховик с крестообразными стержнями 2, по которым могут перемещаться и закрепляться в нужном положении цилиндрические грузы 1 одинаковой массы. На оси маховика находятся два шкива 3, 4 различного радиуса. На один из шкивов наматывается нить 5. Нить перекинута



через неподвижный блок 6. К концу нити прикреплена площадка 8. При помощи грузов 7 различной массы, помещаемых на площадку, маятник приводится во вращательное движение.

Рис. 1. Схема установки: 1 – цилиндрический груз; 2 – стержень; 3 – большой шкив; 4 – малый шкив; 5 – нить; 6 – блок; 7 – груз; 8 – площадка.

Если груз 7, удерживаемый на высоте  $h$ , отпустить, то он будет двигаться поступательно с некоторым ускорением  $a$ .

Воспользуемся формулой пути при равноускоренном

$$h = V_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

прямолинейном движении:

Отсюда, с учетом нулевой начальной скорости, получим формулу для расчета ускорения груза:

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (1)$$

где  $t$  – время, за которое груз пройдет расстояние  $h$ .

Скорость в конце движения груза определяется по формуле:

$$V = at. \quad (2)$$

При падении груза маятник Обербека будет вращаться с некоторым угловым ускорением  $\varepsilon$ .

Если нить, на которой подвешен груз массой  $m$ , нерастяжима и сматывается со шкива маятника Обербека без проскальзывания, то касательное ускорение точек, лежащих на поверхности шкива, будет равно ускорению опускающегося груза:  $a_\tau = a$ .

Зная связь между касательным ускорением точек вращающегося шкива и его угловым ускорением:

$a_\tau = \varepsilon R$ , можно определить угловое ускорение маятника Обербека:

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{R} = \frac{a}{R}, \quad (3)$$

где  $R$  - радиус шкива маятника.

Используя формулу связи между угловой скоростью тела и линейной скоростью точек тела, рассчитаем угловую скорость маятника Обербека:

$$\omega = \frac{V}{R}. \quad (4)$$

## ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Расположить цилиндрические грузы массой  $m$  на концах стержней маятника Обербека симметрично относительно оси вращения.
2. Измерить штангенциркулем диаметр  $d$  шкива, на который будет наматываться нить. Записать радиус шкива: абсолютную погрешность измерения

радиуса  $\Delta R$  по прибору

3. Положить на площадку груз массой  $m$ . Намотать на шкив нить так, чтобы площадка с грузом оказалась на высоте  $h$  над уровнем пола. Измерить высоту масштабной линейкой. Оценить абсолютную погрешность измерения высоты  $\Delta h$  по прибору.
4. Измерить время падения груза секундомером. Опыт повторить 6 раз.

$$\langle t \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}.$$

5. Вычислить среднее время падения груза: абсолютную погрешность измерения времени  $\Delta t$  по секундомеру.
6. Вычислить среднее ускорение  $\langle a \rangle$  опускающегося груза по формуле (1). Рассчитать его абсолютную погрешность:

$$\Delta a = \langle a \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{\langle t \rangle}\right)^2}$$

И относительную погрешность:  $\frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \cdot 100\%$ .

Записать окончательный результат:

$$a = (\langle a \rangle \pm \Delta a) \text{ м/с}^2.$$

7. Вычислить среднюю скорость  $\langle V \rangle$  груза в конце движения по формуле (2).

Рассчитать ее абсолютную погрешность:  $\frac{\Delta V}{\langle V \rangle} \cdot 100\%$ .

Записать окончательный результат:  $V = (\langle V \rangle \pm \Delta V) \text{ м/с}$ .

8. Вычислить среднее угловое ускорение  $\langle \varepsilon \rangle$  шкива по формуле (3). Рассчитать его абсолютную погрешность:

$$\Delta \varepsilon = \langle \varepsilon \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}$$

и относительную погрешность:  $\frac{\Delta\varepsilon}{\langle\varepsilon\rangle} \cdot 100\%$ .

Записать окончательный результат:

$$\varepsilon = (\langle\varepsilon\rangle \pm \Delta\varepsilon) \text{ рад/с}^2.$$

9. Вычислить среднюю угловую скорость  $\langle\omega\rangle$  шкива по формуле (4). Рассчитать ее абсолютную погрешность:

$$\Delta\omega = \langle\omega\rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{\langle V\rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}$$

и относительную погрешность:

$$\frac{\Delta\omega}{\langle\omega\rangle} \cdot 100\%.$$

Записать окончательный результат:

$$\frac{\Delta\omega}{\langle\omega\rangle} \cdot 100\%.$$

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называется материальной точкой, твердым телом?
2. Какое движение называется поступательным? Какое движение называется вращательным?
3. Дать определение скорости тела. Записать формулу, единицу измерения. Изобразить на рисунке вектор скорости.
4. Дать определение угловой скорости тела. Записать формулу, единицу измерения. Изобразить на рисунке угловую скорость.
5. Какова связь между угловой скоростью тела и скоростями точек этого тела?
6. Дать определение ускорения тела. Записать формулу, единицу измерения. Изобразить на рисунке вектор ускорения.
7. Каков физический смысл касательного ускорения тела? Записать формулу, единицу измерения. Изобразить на рисунке вектор касательного ускорения.
8. Каков физический смысл нормального ускорения тела? Записать формулу, единицу измерения. Изобразить на рисунке вектор нормального ускорения.
9. Дать определение углового ускорения. Записать формулу, единицу измерения.

Изобразить на рисунке вектор углового ускорения.

10. Какова связь между угловым ускорением тела и касательным ускорением точек этого тела?

## II. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Расчетные формулы:

а) ускорение груза:

$$a =$$

$$\Delta a =$$

б) скорость груза:

$$V =$$

$$\Delta V =$$

в) угловое ускорение шкива:

$$\varepsilon =$$

$$\Delta \varepsilon =$$

г) угловая скорость шкива:

$$\omega =$$

$$\Delta \omega =$$

Измерения:

Расстояние:  $h =$   $\Delta h =$   $\frac{\Delta h}{h} =$

Радиус шкива:  $R =$   $\Delta R =$   $\frac{\Delta R}{R} =$

время опускания груза:

№	1	2	3	4	5	6
t, с						

$$\langle t \rangle =$$

$$\Delta t =$$

$$\frac{\Delta t}{\langle t \rangle} =$$

6. Расчет ускорения груза:



$$\langle a \rangle =$$

$$\Delta a =$$

$$\frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \cdot 100\% =$$

Окончательный результат:  $a =$

Расчет скорости груза в конце падения:

$$\langle V \rangle =$$

$$\Delta V =$$

$$\frac{\Delta V}{\langle V \rangle} \cdot 100\% =$$

Окончательный результат:  $V =$

8. Расчет углового ускорения шкива:

$$\langle \varepsilon \rangle =$$

$$\Delta \varepsilon =$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\langle \varepsilon \rangle} \cdot 100\% =$$

Окончательный результат:  $\varepsilon =$

9. Расчет угловой скорости шкива:

$$\langle \omega \rangle =$$

$$\Delta \omega =$$

$$\frac{\Delta \omega}{\langle \omega \rangle} \cdot 100\% =$$

Окончательный результат:  $\omega =$

10. Выводы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИЗУЧЕНИЕ КИНЕМАТИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЙ ТВЕРДОГО ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ МАШИНЫ АТВУДА

**Цель работы:** изучить поступательное и вращательное движение; определить кинематические характеристики тел, движущихся поступательно и вращающихся относительно неподвижной оси.

**Приборы и принадлежности:** машина Атвуда, секундомер, перегрузы различной массы.

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ  
Машина Атвуда (рис.1) состоит из вертикальной линейки 10 с сантиметровыми делениями, на верхнем конце которой находится легкий блок 7 известной массы, вращающийся с небольшим трением. Через блок перекинута легкая нить 5 с грузами 4, 9 одинаковой массы. Нить пропущена между якорем и сердечником электромагнита 6. С машиной Атвуда соединен электрический секундомер 2. Он имеет тумблер 3, который может находиться в двух положениях: «секундомер» или «магнит», и рычаг сброса показаний секундомера 1.

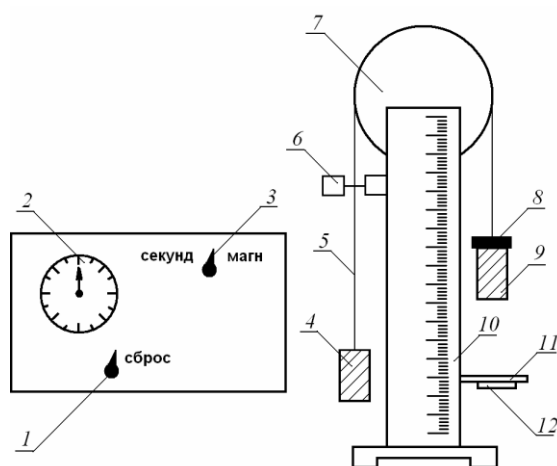


Рис.1. Схема установки: 1 – рычаг сброса; 2 – секундомер; 3 – тумблер; 4 – груз; 5 – нить; 6 – электромагнит; 7 – блок; 8 – перегруз; 9 – груз; 10 – сантиметровая линейка; 11 – приемный столик; 12 – кнопка.

Когда на секундомере тумблер 3 находится в положении «магнит», якорь электромагнита притягивается к сердечнику, зажимает нить, и грузы надежно фиксируются в требуемом положении.

Если на груз 9 положить перегруз 8 и перевести тумблер 3 в положение «секундомер», то система скрепленных грузов начнет двигаться равноускоренно. При касании грузом 9 приемного столика 11 с кнопкой 12 отключается электрическая система секундомера 2, и он показывает время движения груза.

Так как груз 9 движется поступательно с постоянным ускорением без начальной скорости, то его ускорение рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{2h}{t^2},$$

где  $t$  – время, за которое груз проходит расстояние  $h$ .

Скорость груза в конце равноускоренного движения определяется по формуле:

$$V = at . \quad (2)$$

Если нить нерастяжима и движется без проскальзывания, то касательное ускорение точек, лежащих на поверхности блока машины Атвуда, равно ускорению опускающегося груза:

$$a_{\tau} = a . \quad (3)$$

Между касательным ускорением  $a_{\tau}$  точек вращающегося тела и угловым ускорением тела существует связь:

$$a_{\tau} = \varepsilon R , \quad (4)$$

где  $R$  – расстояние до оси вращения, что соответствует радиусу блока машины Атвуда.

Объединив формулы (3) и (4), получим формулу для расчета углового ускорения блока машины Атвуда:

$$\varepsilon = \frac{a}{R} . \quad (5)$$

$R$

Используя формулу связи между угловой скоростью тела и линейными скоростями точек тела, рассчитаем угловую скорость блока машины Атвуда:

$$\omega = \frac{V}{R}. \quad (6)$$

## II. ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Записать значение радиуса блока  $R$  (оно указано на установке) и оценить абсолютную погрешность радиуса  $\Delta R$  как погрешность постоянной величины.
2. Установить столик 11 на расстоянии  $h$  от нулевого деления шкалы. Оценить абсолютную погрешность измерения расстояния  $\Delta h$  по прибору.
3. Груз 9 с перегрузом 8 установить у нулевого деления шкалы и зафиксировать это положение путем переключения тумблера 3 в положение «магнит». Посредством рычага 1 установить стрелку секундомера на нулевое деление его шкалы.
4. Измерить время падения груза. Для этого переключить тумблер 3 в положение «секундомер» и нажать кнопку 12. При достижении грузом 9 столика 11 секундомер отключится. Записать его показание. Опыт повторить 5 раз.

$$\langle t \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}.$$

Вычислить среднее значение времени падения груза:

Рассчитать абсолютную погрешность измерения времени  $\Delta t$  по секундомеру.

5. Вычислить среднее ускорение опускающегося груза по формуле (1). Рассчитать его абсолютную погрешность:

$$\Delta a = \langle a \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{\langle t \rangle}\right)^2} \quad \text{и} \quad \text{относительную погрешность:}$$

$$\frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \cdot 100\%.$$

Записать окончательный результат :  $a = (\langle a \rangle \pm \Delta a) \text{ м/с}^2$ .

6. Вычислить среднюю скорость груза в конце его движения по формуле (2).

Рассчитать её абсолютную погрешность:

$$\Delta V = \langle V \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{\langle t \rangle}\right)^2}$$

и относительную погрешность:

$$\frac{\Delta V}{\langle V \rangle} \cdot 100\%.$$

$$V = (\langle V \rangle \pm \Delta V) \text{ м/с.}$$

Записать окончательный результат:

7. Вычислить среднее угловое ускорение блока по формуле (5). Рассчитать его абсолютную погрешность:

$$\Delta \varepsilon = \langle \varepsilon \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}$$

И относительную погрешность:  $\frac{\Delta \varepsilon}{\langle \varepsilon \rangle} \cdot 100\%$ .

Записать окончательный результат:

$$\varepsilon = (\langle \varepsilon \rangle \pm \Delta \varepsilon) \text{ рад/с}^2.$$

8. Вычислить среднюю угловую скорость блока по формуле (7). Рассчитать её абсолютную погрешность:

$$\Delta \omega = \langle \omega \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{\langle V \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}$$

и относительную погрешность:  $\frac{\Delta \omega}{\langle \omega \rangle} \cdot 100\%$ .

Записать окончательный результат:

$$\omega = (\langle \omega \rangle \pm \Delta \omega) \text{ рад/с.}$$

### III. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называется материальной точкой, твердым телом?
2. Какое движение называется поступательным? Приведите примеры поступательного движения.
3. Какое движение называется вращательным? Приведите примеры вращательного движения.
4. Дать определение скорости тела. Записать формулу, единицу измерения.

Изобразить на рисунке вектор скорости.

5. Дать определение угловой скорости тела. Записать формулу, единицу измерения.

Изобразить на рисунке вектор угловой скорости.

6. Какова связь между угловой скоростью тела и скоростями точек этого тела?

7. Дать определение ускорения тела. Записать формулу, единицу измерения.

Изобразить на рисунке вектор ускорения.

8. Каков физический смысл касательного и нормального ускорений точки?

Записать формулы, единицы измерения. Изобразить на

рисунке векторы  $\vec{a}_\tau, \vec{a}_n$ , дать определение углового ускорения. Записать формулу, единицу измерения. Изобразить на рисунке вектор углового ускорения.

9. Какова связь между угловым ускорением тела и касательным ускорением точек этого тела?

#### IV. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Титульный лист.

2. Цель работы.

3. Приборы и принадлежности.

4. Расчетные формулы:

а) ускорение опускающегося груза:

$$a =$$

$$\Delta a =$$

б) скорость груза в конце движения:

$$V =$$

$$\Delta V =$$

в) угловое ускорение блока:

$$\varepsilon =$$

$$\Delta \varepsilon =$$

г) угловая скорость блока:

$$\omega =$$

$$\Delta \omega =$$

5. Измерения:

пройденное грузом расстояние:

$$h = \quad \Delta h = \quad \frac{\Delta h}{h} =$$

радиус блока:

$$R = \quad \Delta R = \quad \frac{\Delta R}{R} =$$

6. Расчет ускорения опускающегося груза:

$$\langle a \rangle =$$

$$\Delta a =$$

$$\frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \cdot 100\% =$$

Окончательный результат:  $a =$

7. Расчет скорости груза в конце его движения:

$$\langle V \rangle =$$

$$\Delta V =$$

$$\frac{\Delta V}{\langle V \rangle} \cdot 100\% =$$

Окончательный результат:  $V =$

8. Расчет углового ускорения блока:

$$\langle \varepsilon \rangle =$$

$$\Delta \varepsilon =$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\langle \varepsilon \rangle} \cdot 100\% =$$

Окончательный результат:  $\varepsilon =$

9. Расчет угловой скорости блока:

$$\langle \omega \rangle =$$

$$\Delta \omega =$$

$$\frac{\Delta \omega}{\langle \omega \rangle} \cdot 100\% =$$

Окончательный результат:

$$\omega =$$

10. Выводы.



### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

## ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

**Цель работы:** экспериментальная проверка основного уравнения динамики вращательного движения тела.

**Приборы и принадлежности:** маятник Обербека, секундомер, штангенциркуль, масштабная линейка, набор грузов.

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ Маятник Обербека (рис.1) представляет собой маховик с крестообразными стержнями 2, по которым могут перемещаться и закрепляться в нужном положении цилиндрические грузы 1 одинаковой массы. На оси маховика находятся два шкива 3, 4 различного радиуса. На один из них наматывается нить 5. Нить перекинута через неподвижный блок 6. К концу нити прикреплена площадка 8. При помощи грузов различной массы 7, помещаемых на площадку, маятник приводится во вращение.

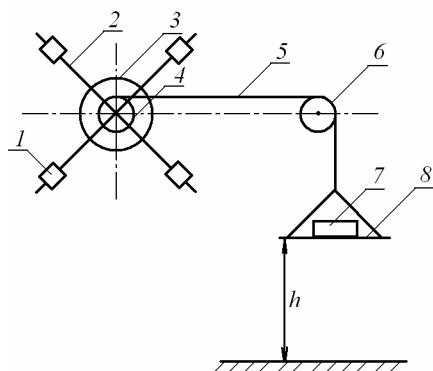


Рис.1. Схема установки: 1 - цилиндрический груз; 2 - крестообразный стержень; 3 - большой шкив; 4 - малый шкив; 5 - нить; 6 - блок; 7 - груз; 8 - площадка.

Маятник Обербека совершает вращательное движение.

Основное уравнение динамики вращательного движения:

$$I\varepsilon = M, \quad (1)$$

где  $I$  - момент инерции тела;  $\varepsilon$  - угловое ускорение;  $M$  - суммарный момент сил, приложенных к телу.

На маятник Обербека действует сила натяжения нити  $T$ . Действием силы трения пренебрегаем. Момент силы натяжения нити определяется по формуле:

$$M = TR, \quad (2)$$

где  $R$  - радиус шкива маятника Обербека.

Силу натяжения нити найдем из уравнения поступательного движения груза на нити:

$$ma = mg - T, \quad (3)$$

где  $m$  - масса груза,  $a$  - ускорение движения груза на нити,  $g$  - ускорение свободного падения. Отсюда сила натяжения нити:

$$T = m(g - a). \quad (4)$$

Так как груз движется поступательно с постоянным ускорением без начальной скорости, то его ускорение рассчитывается по формуле:

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (5)$$

где  $h$  - расстояние, проходимое грузом за время  $t$ . В условиях задачи  $h$  - постоянная величина.

Так как нить, на которой подвешен груз, считается нерастяжимой и сматывается со шкива маятника Обербека без проскальзывания, то ускорение опускающегося груза  $a$  оказывается равным касательному ускорению  $a_\tau$  шкива маятника Обербека: точек, лежащих на поверхности  $a = a_\tau$ . (6)

Соотношение, связывающее касательное ускорение  $a_\tau$  вращающегося тела и угловое ускорение тела:

$$a_\tau = \varepsilon R. \quad (7)$$

Отсюда угловое ускорение маятника Обербека:

$$\varepsilon = \frac{a}{R} = \frac{2h}{Rt^2}.$$

Подставляя формулы (2, 4, 5, 8) в уравнение (1) получим выражение для момента инерции маятника Обербека:

$$I = mR^2 \left( \frac{gt^2}{2h} - 1 \right)$$

Момент инерции тела – величина неизменная. Меняя начальные условия (массу груза на площадке, диаметр шкива) мы должны получить одинаковые значения момента инерции маятника Обербека. Справедливость этого утверждения, установленная опытным путем, может служить проверкой основного уравнения вращательного движения.

## II. ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Расположить цилиндрические грузы на концах стержней маятника Обербека симметрично оси вращения.
2. Измерить штангенциркулем диаметр большого шкива  $d_1$ . Записать значение радиуса большого шкива

$$R_1 = \frac{d_1}{2}.$$

оценить абсолютную погрешность измерения радиуса  $\Delta R_1$  по прибору.

3. Намотать нить на шкив большого диаметра, расположив столик с грузом на высоте  $h$  от пола. Измерить высоту сантиметровой линейкой. Оценить абсолютную погрешность измерения высоты

$\Delta h$  по прибору.

4. Положить на площадку груз массы

$m_1$  Записать значение массы

$m_1$  и ее абсолютную погрешность  $\Delta m_1$  как погрешность

постоянной величины.

5. Предоставив возможность грузу падать, по секундомеру определить время  $t_1$  падения груза. Время падения измерить 5 раз.

$$\langle t \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}.$$

Вычислить среднее время падения груза. Оценить абсолютную погрешность измерения времени  $\Delta t_1$  по секундомеру.

6. Вычислить значение момента инерции маятника Обербека



формуле (9). Рассчитать по упрощенной формуле его абсолютную погрешность:

$$\Delta I_1 = \langle I_1 \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta m_1}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta R_1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t_1}{\langle t_1 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2}$$

и

относительную погрешность:  $\frac{\Delta I_1}{\langle I \rangle} \cdot 100\%$ .

Записать окончательный результат:

7. Измерить штангенциркулем диаметр малого шкива  $d_2$ , Записать

значение радиуса малого шкива  $R_2 = \frac{d_2}{2}$  Оценить абсолютную погрешность измерения радиуса  $\Delta R_2$  по прибору.

8. Перебросить нить на малый шкив. Положить на площадку груз Массой  $m_2$ . Записать значение массы  $m_2$  и ее абсолютную погрешность  $\Delta m_2$  как погрешность постоянной величины.

9. По секундомеру определить время  $t_2$  опускания груза с высоты  $h$  опыт повторить 5

раз  $\langle t_2 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$ .

Оценить абсолютную погрешность измерения времени.  $\Delta t_2$  по секундомеру

10. Вычислить значение момента инерции маятника Обербека  $I_2$  по формуле (9). Рассчитать по упрощенной формуле его абсолютную погрешность:

$$\Delta I_2 = \langle I_2 \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta m_2}{m_2}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta R_2}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t_2}{\langle t_2 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2}$$

и относительную погрешность:  $\frac{\Delta I_2}{\langle I_2 \rangle} \cdot 100\%$ . Записать

окончательный результат:  $I_2 = (\langle I_2 \rangle \pm \Delta I_2) \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

11. Сравнить моменты инерции маятника Обербека, вычисленные при различных начальных условиях. Сделать вывод о справедливости основного уравнения вращательного движения.

### III. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какое движение называется вращательным движением?
2. Записать основное уравнение динамики вращательного движения. Пояснить входящие в него величины и их единицы измерения.
3. Что называется моментом инерции тела? Записать формулу, единицу измерения.
4. Что называется моментом силы относительно оси вращения? Записать формулу, единицу измерения. Пояснить входящие в формулу величины.
5. Что называется вращающим моментом тела? Какая сила приводит тело к вращению?
6. Дать определение угловой скорости. Записать формулу, единицу измерения. Пояснить входящие в формулу величины. Изобразить на рисунке вектор угловой скорости тела.
7. Дать определение углового ускорения. Записать формулу, единицу измерения. Пояснить входящие в формулу величины. Изобразить на рисунке вектор углового ускорения тела.
8. Записать связь углового ускорения тела с касательным ускорением точек тела.
9. Записать связь угловой скорости с линейной скоростью.
10. Записать закон поступательного движения опускающегося груза.

### IV СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Приборы и принадлежности.
4. Расчётные формулы:

момент инерции маятника Обербека:  $I =$

$$\Delta I =$$

5. Измерения:

	$h =$	$\Delta h =$	$\frac{\Delta h}{h} =$
высота:			
радиус большого шкива: $R_1$	$R_1 =$	$\Delta R_1 =$	$\frac{\Delta R_1}{R_1} =$
радиус малого шкива:	$R_2 =$	$\Delta R_2 =$	$\frac{\Delta R_2}{R_2} =$
масса первого груза:	$m_1 =$	$\Delta m_1 =$	$\frac{\Delta m_1}{m_1} =$
масса второго груза:	$m_2 =$	$\Delta m_2 =$	$\frac{\Delta m_2}{m_2} =$
время опускания груза $t_1$ :			

№	1	2	3	4	5
$t_1, c$					

$$\langle t_1 \rangle =$$

$$\Delta t_1 =$$

$$\frac{\Delta t_1}{\langle t_1 \rangle} =$$

время опускания груза  $t_2$  :

№	1	2	3	4	5
$t_2, c$					

$$\langle t_2 \rangle =$$

$$\Delta t_2 =$$

$$\frac{\Delta t_2}{\langle t_2 \rangle} =$$

6. Расчет моментов инерции маятника Обербека:

$$\langle I_1 \rangle =$$

$$\Delta I_1 =$$

$$\frac{\Delta I_1}{\langle I_1 \rangle} \cdot 100\% =$$

Окончательный результат:  $I_1 =$

$$\langle I_2 \rangle =$$

$$\Delta I_2 =$$

$$\frac{\Delta I_2}{\langle I_2 \rangle} \cdot 100\% =$$

Окончательный результат:  $I_2 =$

7. Сравнение  $I_1$  и  $I_2$ .

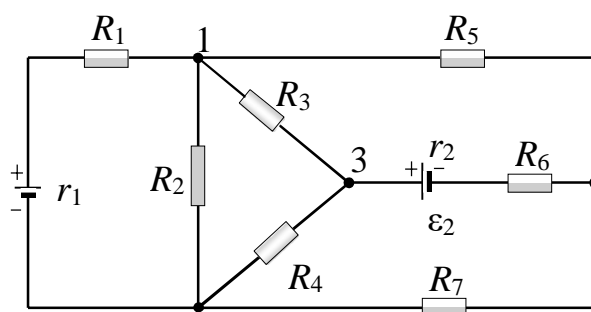
8. Выводы.

## Лабораторная работа № 4

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. **Цель работы:** Ознакомление со свойствами стационарного электрического поля, изучение закона Ома, экспериментальная проверка правил Кирхгофа.

#### 2. Описание лабораторной установки



2  
Рис.228.1

Изучаемая разветвленная электрическая цепь собрана из резисторов и двух источников тока

4 по схеме, приведенной на рис. 228.1. Резисторы смонтированы на панели, на лицевой стороне которой имеются клеммы для присоединения источников тока и гнезда подключения щупов электроизмерительного прибора.

Измерения напряжения производится вольтметром с большим входным сопротивлением, так что подключение вольтметра к участкам цепи практически не изменяет распределение токов в цепи.

#### 3. Методика эксперимента

Закон Ома в интегральной форме позволяет рассчитывать практически любую электрическую цепь. Однако непосредственный расчет раз-



ветвленных цепей, содержащих замкнутые контуры, достаточно сложен. Эта задача упрощается при использовании правил Кирхгофа.

Любая точка разветвленной электрической цепи, в которой сходится не менее трех проводников тока, называется *узлом*. При этом ток, входящий в узел, считается положительным, а ток, выходящий из узла – отрицательным. Участок цепи между двумя узлами называется *ветвью*. Замкнутый участок цепи, состоящий из рассматриваемых ветвей, называется *контуром*. *Первое правило Кирхгофа* является следствием закона сохранения электрических зарядов и сформулировано для узла электрической цепи: *алгебраическая сумма сил токов в узле электрической цепи равна нулю*:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0,$$

где  $n$  – число проводников, сходящихся в узле.

*Второе правило Кирхгофа* гласит: *в любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС источников равна алгебраической сумме падений напряжений на отдельных участках этого контура*:

$$\sum_{k=1}^n \varepsilon_k = \sum_{k=1}^m I_k R_k,$$

где  $n$  – количество источников тока в контуре;  $m$  – число участков в контуре.

При расчете сложных цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа следует придерживаться следующих рекомендаций:

1. Произвольно выбирают направления токов в ветвях цепи. Действительные направления токов в схеме определяются после завершения расчетов: если искомый ток получился положительным, то его направление было выбрано правильно, если отрицательным – его истинное направление противоположно выбранному.

2. Выбирают направления обхода замкнутых контуров цепи (по ча-

совой или против часовой стрелке). Произведение  $IR$  положительно, если ток на данном участке совпадает по направлению с направлением обхода; ЭДС, действующие по направлению обхода, считаются положительными, против направления обхода – отрицательными

3. Составляют столько уравнений, чтобы их число было равно числу неизвестных токов, т.е. числу ветвей в схеме. По первому правилу Кирхгофа составляют  $n - 1$  уравнений, где  $n$  – число узлов в схеме. Остальные уравнения составляют по второму правилу Кирхгофа.

4. Для проверки расчетов составляют *баланс мощностей* в цепи: *алгебраическая сумма мощностей источников тока равна сумме*

$$\sum_{k=1}^n \varepsilon_k I_k = \sum_{k=1}^m I_k^2 R_k,$$

*мощностей, рассеиваемых в ветвях схемы, т.е.*

<sup>2</sup>, где  $n$  – число источников тока в цепи;  $m$  – количество ветвей в схеме.

*Второе правило Кирхгофа* вытекает из закона Ома в интегральной форме для разветвленных цепей и является проявлением закона сохранения энергии.

В настоящей работе проводится проверка выполнимости правил Кирхгофа в разветвленной электрической цепи (рис. 228.1). Для проверки на всех однородных участках измеряются напряжения, измеряются ЭДС источников тока, вычисляются силы токов в ветвях, оцениваются погрешности измерений.

Сопротивление участков цепи  $R_1, R_2, \dots, R_7$  и внутреннего сопротивления источников  $r_1$  и  $r_2$  заданы. Их значения определены высокоточными электроизмерительными приборами.

Напряжения  $U_1, U_2, \dots, U_7$  на однородных участках цепи с сопротивлениями  $R_1, R_2, \dots, R_7$  измеряются вольтметром. Одновременно по полярности измерительных щупов определяются направления токов в участках.

ЭДС источников  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  измеряются как напряжения на зажимах, ко-

гда к источнику подключен только вольтметр.

Для проверки выполнимости первого правила Кирхгофа по значениям напряжений  $U_i$  и соответствующих сопротивлений  $R_i$  по закону Ома определяются силы токов  $I_i$  в участках. Измеренные на участках, на участках цепи  $U_i$  (а, следовательно, и вычисленные силы токов  $I_i$ ) будут содержать систематическую ошибку, связанную с погрешностью измерительного прибора и определяемую его классом точности. По наибольшей приведенной погрешности вольтметра находятся погрешности измерения напряжения  $\Delta U_i$ . По ним вычисляются погрешности определения сил токов  $\Delta I_i$ .

Для исследуемого узла находится алгебраическая сумма сил токов  $\sum i I$  и сравнивая с максимальной ошибкой силы тока в узле  $\sum \Delta i I$ . Для проверки выполнимости второго правила Кирхгофа в исследуемом замкнутом неразветвленном контуре находится отклонение алгебраической суммы  $\sum U_i + \sum I_k r_k$  (содержит измеренные напряжения однородных участков и вычисленные падения напряжений на внутренних сопротивлениях источников) от значения действующей в контуре ЭДС  $\varepsilon_k$ . Отклонение сравнивается с максимальной ошибкой измерений напряжений и ЭДС в контуре.

#### 4. Порядок выполнения работы

1. Присоедините источники тока к электрической цепи.
2. Подготовьте к работе вольтметр (указания на лабораторном столе).
3. Измерьте напряжения  $U_1, U_2, \dots, U_7$  на однородных участках цепи с сопротивлениями  $R_1, R_2, \dots, R_7$ . Одновременно определите направления токов, в участках – если направление тока совпадает с полярностью вольтметра, то вольтметр показывает положительное значение напряжения, если не совпадает – отрицательное. Определенные направления токов укажите

стрелками в протоколе работы. Значения сопротивлений участков  $R_i$  (указаны на установке), результаты измерений напряжений  $U_i$  на участках и верхние пределы  $U_m$  используемых диапазонов измерения напряжений вольтметром запишите в табл. 228.1.

4. Измерьте ЭДС  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , подключив вольтметр к зажимам источников тока, отсоединенных от электрической цепи. Значения ЭДС и внутренних сопротивлений  $r_1$  и  $r_2$  (указаны на установке) запишите в табл. 228.2.

5. Получите у преподавателя задание, для какого узла и какого контура следует провести проверку выполнимости правил Кирхгофа.

## 5. Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте силы токов  $I_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ) в участках цепи, используя закон Ома в форме:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}.$$

2. По наибольшей приведенной погрешности вольтметра  $\gamma = 2,5\%$  определите максимальные ошибки  $\Delta U_i$  измерений напряжений на участках по формуле  $\Delta U_i = \gamma U_m / 100\%$ , где  $U_m$  – конечное значение установленного предела измерений напряжений.

3. Вычислите максимальные абсолютные ошибки определения сил токов в участках по формуле  $\Delta I_i = \Delta U_i / R$ , полагая, что ошибками определения сопротивлений участков можно пренебречь, поскольку они измерены высокоточным омметром. Результаты расчетов запишите в табл. 228.1.

4. Вычислите падение напряжения  $I_i r_k$  (произведения  $I_1 r_1$  и  $I_2 r_2$ ) на внутренних сопротивлениях источника тока.

5. Вычислите максимальные ошибки измерения ЭДС  $\Delta \varepsilon_k$  ( $\Delta \varepsilon_1$  и  $\Delta \varepsilon_2$ ) по формуле  $\Delta \varepsilon_i = \gamma \varepsilon_m / 100\%$ , и максимальные ошибки определения падений напряжений на внутренних сопротивлениях источников  $\Delta I_i r_k$  (как произведе-

дения  $\Delta I_1 r_2$  и  $\Delta I_2 r_2$ ). Результаты расчетов по п.4 и 5 запишите в табл. 228.2.

6. При проверке первого правила Кирхгофа для заданного преподавателем узла распишите алгебраическую сумму сил токов  $\sum I_i$

7. При проверке второго правила Кирхгофа для заданного преподавателем контура выберите направление обхода. По данным табл. 228.1 и 228.2 составьте алгебраическую сумму  $\sum i + i_k U I r$

8. Найдите для выбранного контура отклонение суммы  $\sum i + i_k U I r$  от значения действующей ЭДС  $\sum \epsilon_k$ . Вычислите максимальную ошибку определения напряжений и ЭДС как арифметическую сумму  $\sum \Delta + \Delta + \Delta \epsilon_i$   $i_k k U I r$ , где  $\sum \Delta U_i$  – сумма ошибок измерения напряжений на всех участках исследуемого контура;  $\Delta I_i r_i$  – произведение ошибки определения силы тока в участке с источником на внутреннее сопротивление этого источника, т.е. ошибка определения падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника (в случае контура с двумя источниками арифметическая сумма указанных ошибок для каждого источника);  $\Delta \epsilon_k$  – ошибка измерения ЭДС в контуре (для контура с двумя источниками сумма таких ошибок).

9. Сравните отклонения суммы  $\sum i + i_k U I r$  от  $\sum \epsilon_k$  с максимальной ошибкой определения напряжений и ЭДС. Сделайте вывод.

Таблица 228.1. Результаты измерений напряжений  $U_i$  определения сил токов  $I_i$  на участках цепи и расчет ошибок их определения

Обозначения участка	Сопротивления участка $R_i$ , Ом	Верхний предел используемой шкалы $U_m$ , В	$U_i$ , В	$I_i$ , мА	Максимальные абсолютные ошибки	
					измерения напряжения $\Delta U_i$ , В	определения силы тока $\Delta I_i$ , мА
$R_1$						
...						
$R_7$						

Таблица 228.2. Параметры источников тока, результаты однократных измерений и расчетов

Номер источника	ЭДС $\mathcal{E}_k$ , В	Внутреннее сопротивление $r_k$ , Ом	Падения напряжения на внутренних сопротивлениях $I_i r_k$ , В	Максимальные абсолютные ошибки	
				измерения ЭДС $\Delta \mathcal{E}_k$ , В	определения падения напряжения $\Delta I_i r_k$ , В
1					
2					

Таблица 228.3. Проверка выполнимости первого правила Кирхгофа

Обозначение узла	Уравнение первого правила Кирхгофа	Экспериментальное значение алгебраической суммы сил токов в узле $\sum I_i$ , мА	Максимальная ошибка определения напряжения и ЭДС в узле $\sum I_i$ , мА

Таблица 228.4. Проверка выполнимости второго правила Кирхгофа

Обозначение контура	Уравнение второго правила Кирхгофа	Отклонение алгебраической суммы $\sum U_i - \sum I_i r_k$ от значения $\Delta_k$ , В	Максимальная ошибка определения напряжения и ЭДС в контуре $\Delta_k = \sum U_i - \sum I_i r_k - \Delta_k$

## 6. Контрольные вопросы

1. Что такое электрический ток?
2. Каковы условия возникновения и существования тока в проводнике?
3. Что означает термин «уравнение непрерывности»?
4. Что такое источник тока?
5. Что такое ЭДС источника тока?
6. Почему для возникновения ЭДС в источнике тока необходима работа сторонних неэлектрических сил?

7. Что такое сопротивление и проводимость проводника и каков физический смысл этих величин?
8. Сформулируйте законы Ома для однородного и неоднородного участков цепи.
9. Сформулируйте законы последовательного и параллельного соединения проводников.
10. От чего зависит работа электрического тока?
11. Сформулируйте правила Кирхгофа. В чем их предназначение?



**1. Десятичные приставки к названиям единиц**

Т - тера ( $10^{12}$ )	д - деци ( $10^{-1}$ )	н - нано ( $10^{-9}$ )
Г - гига ( $10^9$ )	с - санти ( $10^{-2}$ )	п - пико ( $10^{-12}$ )
М - мега ( $10^6$ )	м - милли ( $10^{-3}$ )	ф - фемто ( $10^{-15}$ )
к - кило ( $10^3$ )	мк - микро ( $10^{-6}$ )	а - атто ( $10^{-18}$ )

**2. Некоторые внесистемные величины**

1 сут = 86400 с	1" = $4,85 \cdot 10^{-6}$ рад
1 год = 365,25 сут = $3,16 \cdot 10^7$ с	1 мм рт.ст. = 133,3 Па
	$1^\circ = 1,75 \cdot 10^{-2}$ рад
	1эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
1' = $2,91 \cdot 10^{-4}$ рад	

**3. Основные физические постоянные**

Скорость света в вакууме	$c = 3,00 \cdot 10^8$ м/с
Ускорение свободного падения	$g = 9,81$ м/с <sup>2</sup>
Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> /(кг·с <sup>2</sup> )
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31$ Дж/(К·моль)
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Элементарный заряд	$e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг
Удельный заряд электрона	$e/m_e = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Постоянная Вина $b$	$= 2,90 \cdot 10^{-3}$ м К
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга	$R = 3,29 \cdot 10^{15}$ с <sup>-1</sup> $R' = 1,10 \cdot 10^7$ м <sup>-1</sup>
Первый борковский радиус	$r_0 = 5,28 \cdot 10^{-11}$ м
Магнетон Бора	$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м $1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9$ м/Ф
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

Атомная единица массы

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Масса изотопа  $^1\text{H}$

$$m_{\text{H}} = 1,6736 \cdot 10^{-27}$$