

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра физики и методики преподавания физики

Т.И. Пискарёва, И.Н. Анисина, А.С. Лелюхин

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки»

2-издание, стереотипное

Оренбург

2019

УДК 537.3(076.5)

ББК 22.33я7

ПЗ4

Рецензент – доктор физ.-мат. наук, профессор Н.А. Манаков

Пискарёва, Т.И.

ПЗ4

Законы постоянного тока: методические указания / Т.И. Пискарёва, И.Н. Анисина, А.С. Лелюхин; Оренбургский гос. ун-т. – 2-е изд., стереотипное. – Оренбург: ОГУ, 2019.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по изучению разветвленных электрических цепей и закона Джоуля-Ленца. Работы включают теоретическое изложение материала, описание методики проведения опыта и контрольные вопросы для самоподготовки.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Физика» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки».

УДК 537.3(076.5)

ББК 22.33я7

© Пискарева Т.И.,
Анисина И.Н.,
Лелюхин А.С. 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

1 Лабораторная работа №1 Изучение разветвленных электрических цепей.....	4
1.1 Теоретическая часть	4
Складывая почленно эти уравнения, получим.....	6
1.2 Экспериментальная часть	7
1.3 Контрольные вопросы.....	10
2 Лабораторная работа № 2 Проверка закона Джоуля-Ленца.....	11
2.1 Теоретическая часть	11
2.2 Экспериментальная часть	14
2.3 Контрольные вопросы.....	17
Список использованных источников	17

1 Лабораторная работа №1 Изучение разветвленных электрических цепей

Цель работы

1. Изучить правила Кирхгофа и научиться их применять для произвольного контура или узла
2. Получить экспериментальное подтверждение правил Кирхгофа.

1.1 Теоретическая часть

На практике часто приходится рассчитывать сложные (разветвленные) цепи постоянного тока, например по заданным сопротивлениям участков цепи и приложенным ЭДС находить силу тока во всех участках. Решение этой задачи значительно облегчается, если пользоваться двумя правилами, сформулированными Г. Кирхгофом (1847).

Любая точка разветвления цепи, в которых сходится не менее трех проводников с током, называется узлом. Первое правило Кирхгофа формулируется следующим образом:

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю

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

Токи, втекающие в узел, считаются положительными, а токи, вытекающие из него, - отрицательными. Например, для рисунка 1 первое правило Кирхгофа запишется так: $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$

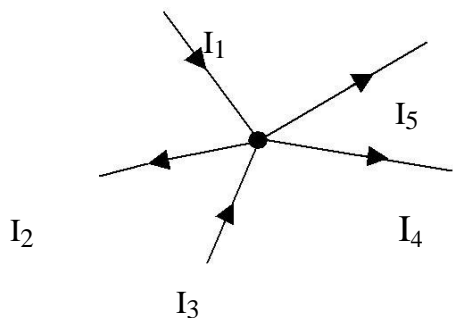


Рисунок 1

Первое правило Кирхгофа вытекает из закона сохранения электрического заряда. Действительно, в случае установившегося постоянного тока ни в одной точке проводника и ни на одном его участке не должны накапливаться электрические заряды. В противном случае токи не могли бы оставаться постоянными.

Второе правило Кирхгофа является обобщением закона Ома на разветвленные электрические цепи:

В любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I на сопротивление R соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС, встречающихся в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{k=1}^n E_k$$

При расчете сложных цепей постоянного тока с применением правил Кирхгофа необходимо:

1. Выбрать произвольное направление токов на всех участках цепи; действительное направление токов определяется при решении задач: если искомый ток получится положительным, то его направление было выбрано правильно, отрицательным – его истинное направление противоположно выбранному.

2. Выбрать направление обхода контура и строго его придерживаться; произведение тока каждого участка на его сопротивление положительно, если ток на каждом участке совпадает с направлением обхода, или отрицательно, если обход и ток направлены на встречу; ЭДС источника пишется с плюсом, если источник приходит (при обходе контура) от отрицательного полюса (от -) к положительному (к +).

3. Составить столько уравнений, чтобы их число было равно числу искомых величин (в систему уравнений должны входить все сопротивления и ЭДС рассматриваемой цепи); каждый рассматриваемый контур должен содержать

хотя бы один элемент, не содержащийся в предыдущих контурах, иначе получатся уравнения, являющиеся простой комбинацией уже составленных.

Рассмотрим контур, состоящий из трех участков (рис. 2). Направление обхода по часовой стрелке примем за положительное, отметив, что выбор этого направления совершенно произволен. Если направления токов совпадают с направлением обхода контура, они считаются положительными; если не совпадают с направлением обхода контура, они считаются отрицательными. Источники э.д.с. считаются положительными, если создают ток, направленный в сторону обхода контура. Применяя закон Ома для участков цепи, можно записать:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 &= \varphi_A - \varphi_B + E_1, \\ -I_2 R_2 &= \varphi_B - \varphi_C - E_2, \\ I_3 R_3 &= \varphi_C - \varphi_A + E_3. \end{aligned}$$

Складывая почленно эти уравнения, получим

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_1 - E_2 + E_3.$$

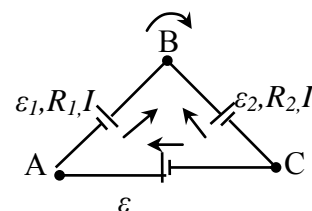


Рисунок 2

В качестве примера использования правил Кирхгофа рассмотрим схему (рис.3) измерительного моста Уитстона (Ч. Уитстон (1802—1875) — английский физик). Сопротивления R_1, R_2, R_3 и R_4 образуют его плечи. Между точками А и В моста включена батарея с э.д.с. E и сопротивлением r , между точками С и D включен гальванометр с сопротивлением R_G . Для узлов А, В и С, применяя первое правило Кирхгофа, получим

$$\begin{aligned} I_r - I_1 - I_4 &= 0, \\ I_2 + I_3 - I_r &= 0, \\ I_1 - I_2 - I_G &= 0. \end{aligned}$$

Для контуров ACBEA, ACDA и CBDC, согласно второму правилу Кирхгофа, можно записать:

$$\begin{aligned} I_r r + I_1 R_1 + I_2 R_2 &= E, \\ I_1 R_1 + I_G R_G - I_4 R_4 &= 0, \\ I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_G R_G &= 0. \end{aligned}$$

Если известны все сопротивления и э.д.с, то, решая полученные шесть уравнений, можно найти неизвестные значения токов. Изменяя известные сопротивления R_2, R_3 и R_4 , можно добиться того, чтобы ток через гальванометр был равен нулю ($I_G = 0$). Тогда

$$I_1 = I_2, \quad I_3 = I_4,$$

$$I_1 R_1 = I_4 R_4, \quad I_2 R_2 = I_3 R_3.$$

Из последних уравнений следует, что

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}, \quad \text{или} \quad R_1 = \frac{R_2 R_4}{R_3}.$$

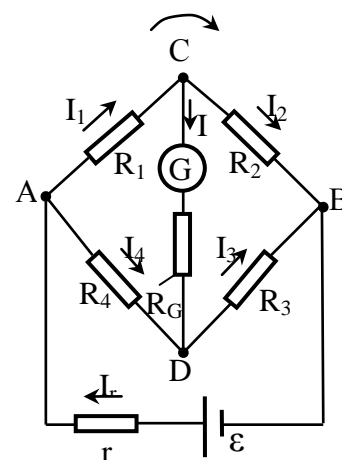


Рисунок 3

Таким образом, в случае равновесного моста ($I_G = 0$) при определении искомого сопротивления R_1 э.д.с. батареи, сопротивления батареи и гальванометра роли не играют.

1.2 Экспериментальная часть

В лабораторной работе используется установка, состоящая из двух источников с ЭДС ϵ_1 и ϵ_2 соответственно. С этим источниками соединены семь сопротивлений по схеме, изображенной на рисунке 4.

Источники тока питаются от сети ~ 220 В. Значения сопротивлений R_1, R_2, \dots, R_7 , а также значения внутренних сопротивлений первого (r_1) и второго (r_2) источников ЭДС указаны непосредственно на лабораторной установке. Слева на установке расположен вольтметр, которым измеряют напряжения на каждом сопротивлении и E_1 и E_2 , с допустимой для данной работы точностью. Также с его помощью определяют направление тока на каждом сопротивлении.

Подключают установку к сети ~ 220 В. Тумблеры K_1 и K_2 ставят в положение «выкл.» и вольтметром измеряют напряжение U_1 на полюсах

первого и U_2 на полюсах второго источников тока. Так как сопротивление вольтметра примерно в 2000 раз больше внутреннего сопротивления источников, то $U_1 \approx \varepsilon_1$ и $U_2 \approx \varepsilon_2$. Это утверждение непосредственно следует из рассмотрения рисунка 4. Обозначим сопротивление вольтметра через R_V , внутреннее сопротивление источника через r . Запишем второе правило Кирхгофа для этой цепи:

$$IR_V + Ir = \varepsilon$$

Но так как $R \gg r$, то в левой части уравнения можно пренебречь слагаемым Ir .

$$IR_V \approx \varepsilon.$$

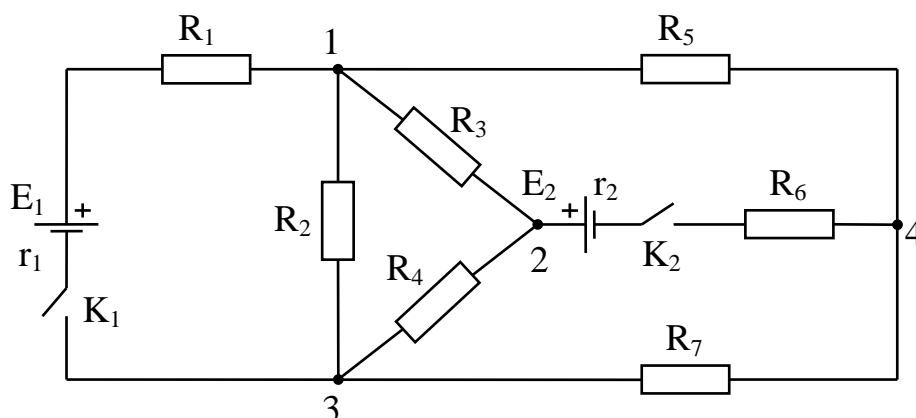


Рисунок 4

Но IR_V как раз равно напряжению на вольтметре, равное показаниям вольтметра U_V : $U_V \approx \varepsilon$.

Определив ε_1 и ε_2 , переходят к измерению напряжений U_i на каждом из семи ($i=1,2,3,\dots,7$) сопротивлений R_i .

Затем с помощью вольтметра определяют направление тока в каждом R_i . Для этого концы каждого R_i соединяют с вольтметром так, чтобы его стрелка

отклонялась вправо. Ток I_i и R_i течет в сторону понижения потенциала, то есть от «+» к «-», от места контакта провода, соединенного с положительной клеммой вольтметра. Определенные таким образом направления I_i , указывают стрелкой на схеме в лабораторном отчете. По закону Ома для участка цепи находят все силы токов

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

Значения I_i также вносят в таблицу экспериментальных данных.

Таблица 1

$\varepsilon_1 \approx U_1 =$ В, $r_1 = 56$ Ом; $\varepsilon_2 \approx U_2 =$ В, $r_2 = 56$ Ом							
№	1	2	3	4	5	6	7
U_i , В							
R_i , Ом							
I_i , А							

После заполнения таблицы проверяют выполнимость первого правила Кирхгофа в узлах 1,2,3, и 4.

Затем выбирают четыре замкнутых контура (по усмотрению студента) и для каждого из них проверяют выполнимость второго правила Кирхгофа.

Для одного узла и контура проверяют выполнимость первого и второго правил Кирхгофа с учетом ошибок измерений. При этом надо учесть, что абсолютная ошибка измерения напряжения ΔU_i на каждом сопротивлении равна приборной ошибке $\Delta U_{пр}$:

$$\Delta U_i = \Delta U_{пр} = Y \frac{U_{max}}{100}$$

где Y – класс точности вольтметра (указан на вольтметре);

U_{\max} – максимальное значение напряжения, измеряемое вольтметром ($U_{\max}=10\text{В}$).

Ошибку измерения тока ΔI_i вычисляют по алгоритму нахождения ошибки косвенных измерений, так как

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

$$\Delta I_i = \sqrt{\left(\frac{\delta I_k}{\delta U_k} \cdot \Delta U_k\right)^2 + \left(\frac{\delta I_k}{\delta R_k} \Delta R_k\right)^2}$$

Абсолютную ошибку ΔR_i каждого сопротивления примите равной 5 Ом.

Сделайте выводы.

1.3 Контрольные вопросы

1. Сформулируйте первое правило Кирхгофа. Проиллюстрируйте его примерами из Вашей работы.
2. Сформулируйте второе правило Кирхгофа. Приведите примеры на составление уравнений на основе второго правила Кирхгофа.
3. Сколько независимых уравнений надо составить, чтобы вычислить значения токов во всех участках цепи?
4. Цель и порядок выполнения работы.
5. Подтверждают ли полученные Вами экспериментальные данные правила Кирхгофа?
6. Как в данной работе определяются ошибки измерения тока и напряжения?

2 Лабораторная работа № 2 Проверка закона Джоуля-Ленца

Цель работы

1. Познакомиться с теоретическим обоснованием закона Джоуля-Ленца.
2. Экспериментально подтвердить этот закон.

2.1 Теоретическая часть

Когда проводник неподвижен, работа тока идет на увеличение внутренней энергии проводника, в результате чего проводник нагревается

$$A = Uq = IUt . \quad (1)$$

При этом вся энергия тока идет на выделение тепла

$$Q = IUt . \quad (2)$$

Исследуя на опыте нагревание проводников током, российский физик Э.Х. Ленц и английский физик Д. Джоуль установили, что количество теплоты, выделяющееся в проводнике при прохождении через него электрического тока, прямо пропорционально сопротивлению R проводника, квадрату силы тока I и времени t . Этот закон, получивший название закона Джоуля-Ленца, можно выразить следующей формулой:

$$Q = I^2Rt , \quad (3)$$

где Q – количество теплоты, выделившееся в проводнике, Дж;

R – сопротивление проводника, Ом;

I – ток, идущий по проводнику, А;

t – время, с.

При параллельном соединении проводников удобнее пользоваться другой записью закона Джоуля-Ленца, а именно:

$$Q = \frac{U^2}{R} t.$$

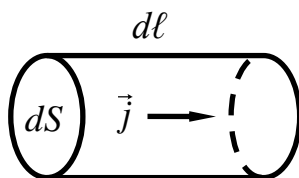
Если ток в проводнике изменяется с течением времени, то закон Джоуля-Ленца запишется в виде:

$$Q = \int_0^t I^2 R dt. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) – аналитическая запись закона Джоуля-Ленца в интегральной форме.

От интегральной формы закона Джоуля-Ленца можно перейти к дифференциальной форме. Для этого выделим в проводнике элементарный цилиндрический объем dV длиной $d\ell$ и площадью основания dS , ось которого совпадает с вектором плотности тока \vec{j} , а основания перпендикулярны \vec{j} (рисунок 1). Вектор плотности тока сонаправлен с вектором напряженности электрического поля в проводнике $\vec{j} \uparrow \uparrow \vec{E}$.

Сила тока dI в выделенном цилиндре запишется



в виде

$$dI = j dS. \quad (5)$$

Рисунок 1

Сопротивление элементарного цилиндра

$$R = \rho \frac{d\ell}{dS}, \quad (6)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника. Единица удельного электрического сопротивления – ом-метр (Ом·м).

За малое время dt в объеме dV элемента проводника выделяется количество теплоты

$$\delta Q = I^2 R dt . \quad (7)$$

Учитывая (5) и (6) перепишем (7) в виде:

$$\delta Q = j^2 dS \cdot d\ell \cdot \rho \frac{d\ell}{dS} dt = j^2 \rho dS d\ell dt , \quad (8)$$

где $dS \cdot d\ell = dV$ – объем элементарного цилиндра.

Количество теплоты, выделяющееся за единицу времени в единице объема, называется **удельной тепловой мощностью тока**. Она равна

$$w = \frac{\delta Q}{dV dt} . \quad (9)$$

Подставив (8) в (9) получаем

$$w = \rho j^2 . \quad (10)$$

Учитывая закон Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} ,$$

где $\gamma = \frac{1}{\rho}$ – удельная проводимость, измеряемая в сименс на метр (См/м);

\vec{E} – напряженность электрического поля в проводнике, измеряемая в вольтах на метр (В/м).

Перепишем (10) в виде

$$w = \gamma E^2. \quad (11)$$

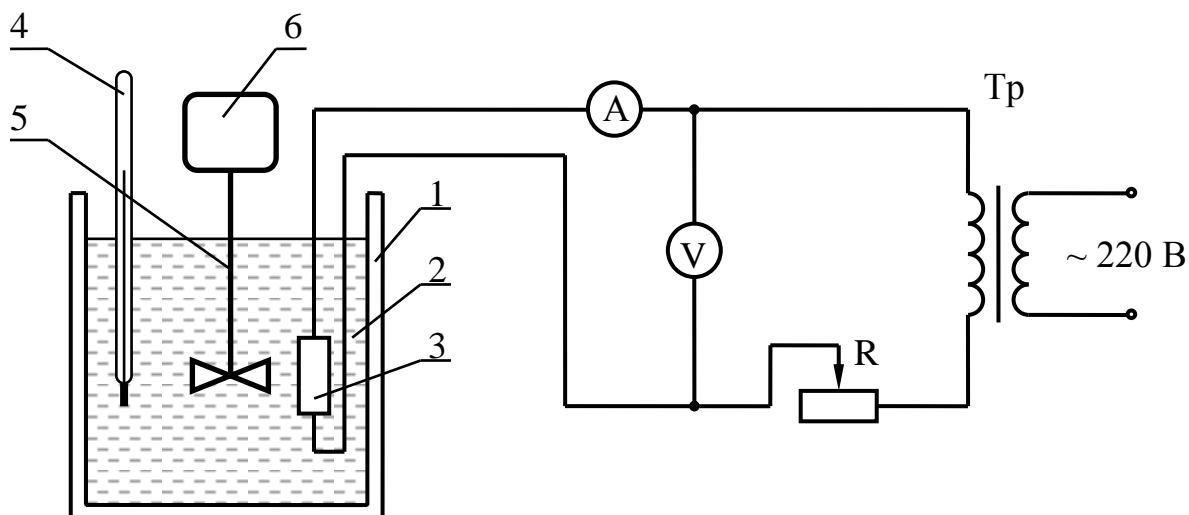
Таким образом, запись закона Джоуля-Ленца в дифференциальной форме имеет вид:

$$w = \rho j^2 = \gamma E^2. \quad (12)$$

В экспериментальной части работы делается опытная проверка закона Джоуля-Ленца в интегральной форме (2).

2.2 Экспериментальная часть

Работа выполняется на установке, состоящей из калориметра 1, заполненного водой 2, нагревателя 3, термометра 4, мешалки 5 с мотором 6, трансформатора, реостата, амперметра и вольтметра (рисунок 2). Мотор мешалки и трансформатор подключаются к сети переменного напряжения 220В.



1. Электрические приборы соедините в схему, как показано на рисунке 2. После сборки схемы ее необходимо предъявить для проверки преподавателю или лаборанту.

2. После проверки схемы установите ползунок реостата в среднее положение, подключите к сети нагреватель и мотор мешалки. Сразу после включения при помощи реостата установите ток через нагреватель $I = 0,5 \dots 0,8$ А (значение задается преподавателем) и отключите его от сети.

3. После 1 – 2 минут работы мешалки вновь включите нагреватель в сеть, запустите секундомер для отсчета интервала времени $t = 10$ мин и сделайте отсчет температуры воды T_1 . При отсутствии секундомера пользуйтесь часами с секундной стрелкой. Момент включения и отключения нагревателя необходимо фиксировать с точностью ± 1 с.

4. По истечении 10 мин отключите нагреватель. Через 1 – 2 мин после отключения сделайте отсчет температуры воды T_2 и выключите из сети мотор мешалки. Значения напряжения U , силы тока I , времени t , температур T_1 и T_2 занесите в таблицу 1.

5. Найдите изменение температуры воды ($T_2 - T_1$) и по уравнению теплового баланса вычислите количество теплоты Q_{Σ} , необходимое для нагревания воды, мешалки, нагревателя и внутренней части калориметра от T_1 до T_2 .

$$Q_{\Sigma} = mc + C T_2 - T_1 \quad (13)$$

В уравнении (13) $m = 2$ кг – масса воды в калориметре, $c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – удельная теплоемкость воды, $C = 100 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – общая теплоемкость мешалки, нагревателя и нагреваемых частей калориметра.

По уравнению (2) вычислите количество теплоты $Q_T = IUt$, выделяющееся в нагревателе согласно закону Джоуля-Ленца. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений

I, A	$U, \text{В}$	$t, \text{с}$	$T_1, \text{К}$	$T_2, \text{К}$	$Q_3, \text{Дж}$	$Q_T, \text{Дж}$

6. Рассчитайте ошибки ΔQ_3 и ΔQ_T по формулам:

$$\Delta Q_3 = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_3}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_3}{\partial c} \Delta c\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_3}{\partial C} \Delta C\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_3}{\partial T_1} \Delta T_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_3}{\partial T_2} \Delta T_2\right)^2}, \quad (14)$$

$$\text{или } \Delta Q_3 = Q_3 \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta c_1}{c_1} + \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta T_1}{T_1} + \frac{\Delta T_2}{T_2} \right)$$

$$\Delta Q_T = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_T}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_T}{\partial U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_T}{\partial t} \Delta t\right)^2}, \quad (15)$$

$$\text{или } \Delta Q_T = Q_T \left(\frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta t}{t} \right)$$

где $\Delta m = 0,05 \text{ кг}$, $\Delta c = 0,05 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, $\Delta C = 0,01 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$, $\Delta T_1 = 0,5 \text{ К}$,

$\Delta T_2 = 0,5 \text{ К}$, $\Delta t = 1 \text{ с}$, ΔU и ΔI – приборные погрешности вольтметра и амперметра.

Запишите результат

$$\left. \begin{aligned} Q_3 &= \bar{Q}_3 \pm \Delta Q_3 \\ Q_T &= \bar{Q}_T \pm \Delta Q_T \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

В качестве \bar{Q}_3 и \bar{Q}_T возьмите значения из таблицы 1.

7. Сравните результаты полученных значений $\bar{Q}_Э$ и \bar{Q}_T , сделайте заключение о выполнимости закона Джоуля-Ленца.

Закон Джоуля-Ленца выполняется, если величина Q_T попадает в доверительный интервал экспериментального значения.

2.3 Контрольные вопросы

1. Поясните цель работы, порядок выполнения. Прокомментируйте получаемые результаты и сделайте выводы.
2. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца в интегральной форме.
3. Выведите закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме. В чем заключается физический смысл удельной тепловой мощности тока?
4. Какова, на ваш взгляд, практическая ценность закона Джоуля-Ленца?
5. Расскажите, как вычисляются доверительные интервалы для $Q_Э$ и Q_T . Для чего это делается?

Список использованных источников

- 1 **Савельев, И.В.** Курс общей физики [Текст]: учебное пособие. В 3 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1988. – 496 с.
- 2 **Трофимова, Т.И.** Курс физики [Текст]: учебное пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2001. – 542 с