

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Кафедра физики

А.С. Климов, А.А. Зенин

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КРУГОВОГО ТОКА

Руководство к лабораторной работе по физике для студентов всех
специальностей

Томск
2023

УДК 537.87
ББК 22.334
К 49

Рецензент

Лячин А.В., доцент, канд. физ.-мат. наук

Одобрено на заседании кафедры физики, протокол № 104 от
16.04.2023.

**Климов, Александр Сергеевич, Зенин, Алексей
Александрович**

Изучение магнитного поля кругового тока: методические указания по выполнению лабораторных работ / А.А. Зенин, А.С. Климов. – Томск: Томский гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 19 с.

Изложена краткая теория и описана экспериментальная установка для исследования магнитного поля на оси кругового витка с током, а также методика проведения измерений и обработки результатов.

Для студентов ТУСУРа, обучающихся по всем направлениям подготовки и специальностям.

УДК 537.87

ББК 22.334

Климов А.С., Зенин А.А., 2023

Томск. гос. ун-т систем
упр. и радиоэлектроники,
2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.....	4
2 МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ.....	7
3 ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	9
4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	13
5 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	15

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является изучение магнитного поля на оси витка с током и экспериментальная проверка закона Био – Савара – Лапласа.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Магнитным полем называется одна из форм проявления электромагнитного поля. Магнитное поле действует только на движущиеся электрически заряженные частицы и тела, на проводники с током и частицы или тела, обладающие магнитными моментами.

Магнитное поле создаётся проводниками с током, движущимися электрически заряженными частицами и телами, намагниченными телами, а также переменным электрическим полем.

Силовой характеристикой магнитного поля служит вектор магнитной индукции \vec{B} . Согласно закону Био–Савара–Лапласа каждый элемент проводника с током $I d\vec{l}$ создает в точке с радиусом – вектором \vec{r} магнитное поле с индукцией

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (1.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Направление вектора $d\vec{B}$ определяется векторным произведением двух векторов $d\vec{l}$ и \vec{r} или (что тоже самое) направление вектора $d\vec{B}$ с векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} образует правовинтовую систему, т.е. вектор магнитной индукции всегда перпендикулярен плоскости, в которой лежат векторы $d\vec{l}$ и \vec{r} .

Для графического изображения магнитных полей используются линии магнитной индукции – это воображаемые линии в пространстве, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} в этих точках. Линии индукции всегда замкнуты и охватывают проводники с токами, создающими поле. Направление линий индукции магнитного поля определяется правилом Максвелла (правилом буравчика): если ввинчивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление вращения рукоятки буравчика укажет направление линий магнитной

индукции.

Для магнитного поля справедлив *принцип суперпозиции*: в каждой точке пространства вектор магнитной индукции \vec{B}_Σ созданный в этой точке всеми источниками магнитных полей равен векторной сумме векторов магнитных индукций \vec{B}_k , созданных в этой точке всеми источниками магнитных полей:

$$\vec{B}_\Sigma = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots = \sum \vec{B}_k \quad (1.2)$$

Используя выражение (1.1) и принцип суперпозиции, можно рассчитать магнитное поле, создаваемое проводником произвольной формы с током. Рассчитаем индукцию магнитного поля на оси витка с током (на оси кругового тока) на расстоянии Z от центра витка (рис.1.1).

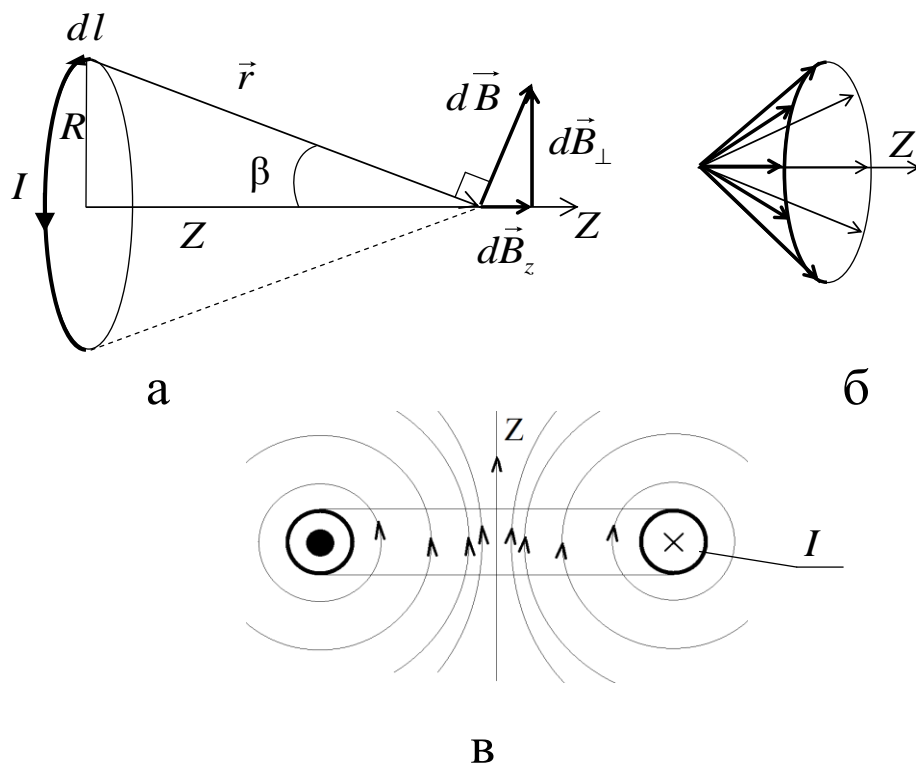


Рисунок 1.1- Конфигурация магнитного поля, создаваемого круговым током.

Векторы магнитной индукции \vec{B} , создаваемые разными элементарными токами $I d\vec{l}$, образуют конический веер, как показано на рис.1.1б. Из соображений симметрии можно заключить: результирующий вектор \vec{B} направлен вдоль оси кругового контура.

В результирующий вектор \vec{B} вносят вклад только составляющие элементарных векторов $d\vec{B}$, направленные по оси кругового тока (см. рис.1.1а) равные по модулю $dB_z = dB \cdot \sin \beta = \frac{R}{r} dB$.

Угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} всегда прямой, поэтому $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl\vec{r}}{r^3}$.

$$dB_z = \frac{R}{r} dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{IdlR}{r^3}. \quad (1.3)$$

Проинтегрировав (1.3) по всей длине контура с током и заменив r на $\sqrt{R^2 + Z^2}$ (см. рис. 1.1а), получим

$$B = \int dB_z = \frac{\mu_0 IR}{4\pi(R^2 + Z^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + Z^2)^{3/2}}. \quad (1.4)$$

Полученное выражение определяет величину индукции магнитного поля на оси кругового тока. Как следует из (1.4), магнитная индукция не зависит от знака Z . Это значит, что в точках на оси Z , симметричных относительно центра витка с током, вектор \vec{B} имеет одинаковую величину и направление (см. рис.1.1в). При $Z = 0$ выражение (1.4) переходит в выражение для индукции магнитного поля в центре кругового тока

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (1.5)$$

В реальном случае поле создается не одним витком, а катушкой, содержащей некоторое число витков N . Это позволяет получать значительное по величине магнитное поле, пропуская по катушке небольшой ток I_0 . Если длина катушки значительно меньше радиуса ее поперечного сечения R , то для приближенного расчета поля катушки можно воспользоваться выражением (1.4), подставляя вместо тока I величину $N \cdot I_0$.

Если по катушке протекает переменный синусоидальный ток, то вектор магнитной индукции тоже изменяется со временем по закону синуса:

$$B = B_m \cdot \sin(\omega t).$$

2 МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения магнитной индукции можно использовать различные проявления магнитного поля: эффект Холла, явление электромагнитной индукции, действие на магнитную стрелку и другие. В данной работе использовано явление электромагнитной индукции. Это явление заключается в том, что если катушку, состоящую из некоторого числа витков N_1 , пронизывает переменный во времени магнитный поток, то по закону Фарадея-Максвелла в ней возникает Э.Д.С. индукции, прямо пропорциональная скорости изменения этого потока и числу витков:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_n}{dt} \cdot N_1, \quad (2.1)$$

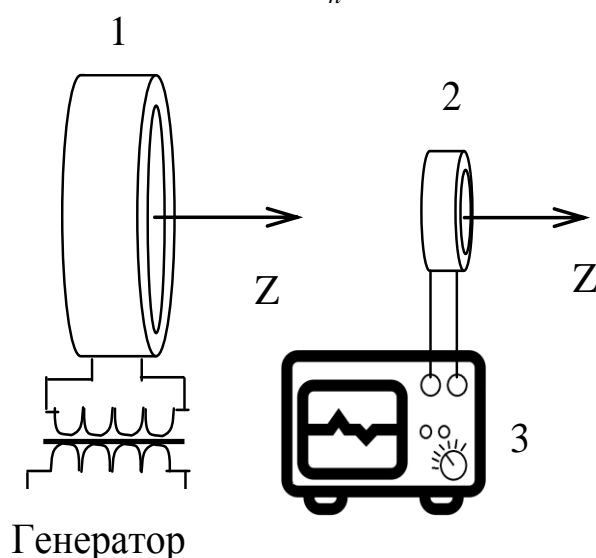
где Φ_n – нормальная составляющая магнитного потока, пронизывающего поперечное сечение катушки S .

Так как $\Phi_n = B_n \cdot S$, выражение (2.1) можно представить в виде

$$\varepsilon_i = -N_1 \cdot \frac{d(B_n S \cdot \sin \omega t)}{dt} = -N_1 B_n \omega S \cdot \cos \omega t, \quad (2.2)$$

где ω - круговая частота.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.1. Э.Д.С. индукции в измерительной катушке 2 (рис.2.1) создается изменяющимся магнитным потоком Φ_n .



1 – катушка с током, создающая магнитное поле;

2 – измерительная катушка; 3 – измерительный прибор.

Рисунок 2.1 - Схематическое изображение экспериментальной установки.

Значение магнитной индукции B_n в выражении (2.2) является усредненным по площади сечения измерительной катушки. Это значит, что оно всегда меньше истинного значения магнитной индукции на оси витка с током, и тем ближе к нему, чем меньше поперечное сечение измерительной катушки. В данной работе площадь поперечного сечения измерительной катушки в несколько раз меньше площади витка с током, создающего магнитное поле (см. рис.2.1). Примерно можно считать величину B_n , равной амплитудному значению магнитной индукции B_m создаваемой круговым током на оси Z .

В выражении (2.2) множитель перед функцией $\cos \omega t$ представляет собой амплитудное значение Э.Д.С.

$$\varepsilon_m = B_m S \omega N_1. \quad (2.3)$$

Таким образом, проведя измерения Э.Д.С. индукции, по формуле (2.3) можно рассчитать амплитудное значение индукции магнитного поля на оси катушки с током (см. рис.2.1). Измерение Э.Д.С. индукции можно осуществить с помощью милливольтметра или осциллографа. Окончательное выражение для расчета амплитудного значения магнитной индукции в любой точке на оси Z имеет вид

$$B_m = \frac{\varepsilon_m}{S \omega N_1}, \quad (2.4)$$

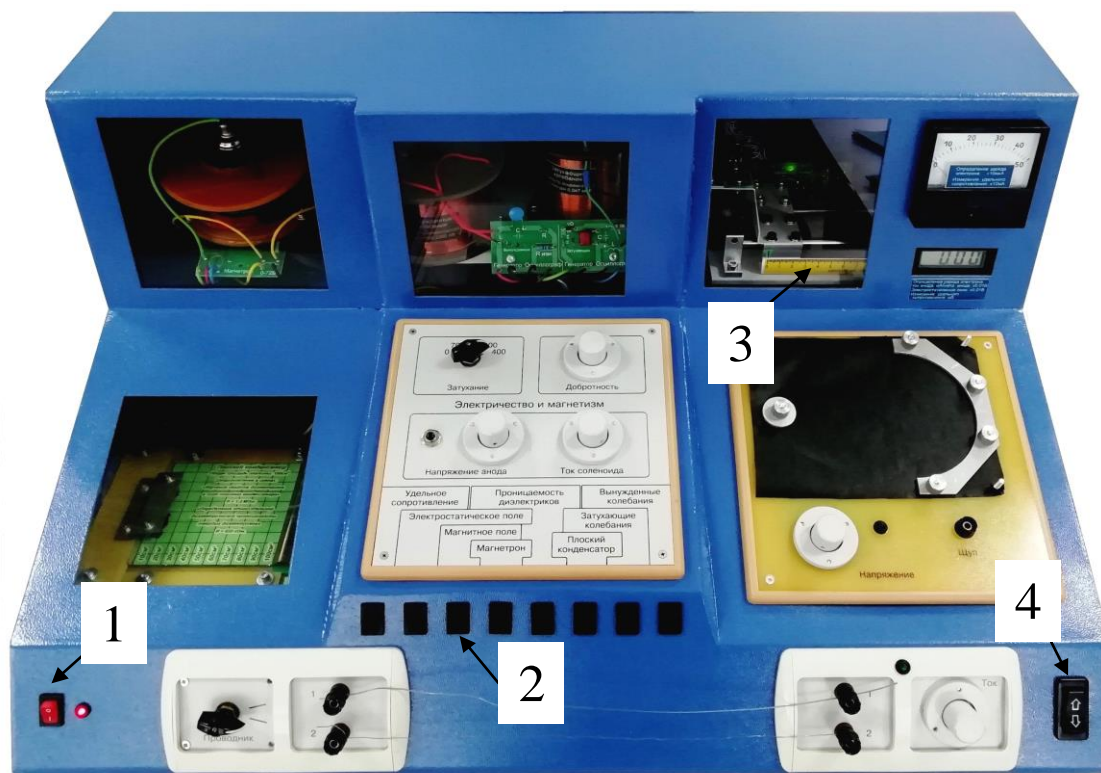
где ε_m – амплитудное значение Э.Д.С. катушки в точке Z ;

S – площадь поперечного сечения измерительной катушки (диаметр поперечного сечения катушки составляет 22 мм);

ω - круговая частота переменного напряжения, питающего круговой виток;

N_1 – число витков измерительной катушки ($N_1 = 5100$ витков).

Схема экспериментальной установки, представленная на рис. 2.1, состоит из катушки с током, создающей магнитное поле, измерительной катушки. По катушке протекает переменный синусоидальный ток. Все устройство смонтировано на лабораторном макете (рис. 2.2).



1 – Кнопка «Сеть»; 2 – панель выбора работы; 3 –линейка; 4 –клавиша перемещения измерительной катушки.

Рисунок 2.2 – Внешний вид макета.

Катушка с током и измерительная катушка смонтированы в правом верхнем углу макета. Оси симметрии катушек совпадают. Для контроля расстояния между катушкой с током и измерительной катушкой используется линейка.

3 ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание

Провести исследование индукции магнитного поля B_m на оси кругового тока в зависимости от расстояния Z до центра витка.

Порядок выполнения работы

3.1 Запустить лабораторную работу. На макете на панели выбора работ выключить все тумблеры. Включить питание макета, нажав на кнопку «Сеть». Включить питание компьютера и дождаться загрузки Windows.

3.2 На рабочем столе Windows открыть папку "Лаборатория". В открывшемся окне в списке лабораторных работ выбрать и запустить программу «Изучение магнитного поля

кругового тока». Во вновь открывшемся окне появится **стенд (панель)** данной работы, на котором расположены окно осциллографа с соответствующими маркерами, электронная таблица и набор кнопок управления (рис. 3.1).

3.3 Выбрать на панели макета работу «**Магнитное поле**».

3.4 Тумблером перемещения установить измерительную катушку в центр катушки с током (т.е. в положение $Z=0$).

3.5 Измерить амплитуду колебаний. Для этого, взяв мышью нижний горизонтальный маркер (\perp), установить его в нуль отсчета амплитуды (см. рис. 3.1). Вторым горизонтальный маркер (верхний \perp) установить на максимальное значение амплитуды колебаний.



- 1 – Окно осциллографа; 2 – горизонтальные измерительные маркеры; 3 – вертикальные измерительные маркеры;
4 – окно электронной таблицы.

Рисунок 3.1 – Внешний вид окна лабораторной работы.

3.6 Записать текущие показания эксперимента, для этого в окно Z ввести соответствующее значение положения измерительной катушки, и нажать кнопку «Добавить результат».

3.7 Повторить п.п. 3.5, п.п 3.6 для других значений Z , при этом каждый раз увеличивая Z на 0,5 см. Общее число измерений должно быть не менее 12.

3.8 Измерить период колебания T , для этого установить вертикальные маркеры на два соседних максимума. Период колебаний будет отображен внизу экрана, в окне « $X_{\max-\min}$ » (обратить внимание на единицы измерения t – миллисекунды,

μ - микросекунды). Записать полученное измерение в рабочую тетрадь. По значению периода определить круговую частоту

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

3.9 Показания электронной таблицы переписать в рабочую таблицу в тетради (см. табл. 3.1). Дальнейшую обработку результатов эксперимента и построения графиков проводить в рабочей тетради.

Таблица 3.1- Результаты прямых и косвенных измерений

Z , см	ε_m , В	B_m , Тл	$B_m^{-2/3}$, Тл $^{-2/3}$	Z^2 , см 2	Примечание
0					$\varepsilon(S) = 10\%$ $\varepsilon(N_1) = 1\%$ $\varepsilon(\varepsilon_m) = 10\%$
0,5					
1					
...					
6,5					

3.10 После записи данных в рабочую тетрадь закрыть все окна на экране компьютера.

3.11 Выключить компьютер.

3.12 Выключить питание макета, нажав кнопку «Сеть».

3.13 По формуле (2.4) рассчитать индукцию магнитного поля B_m и занести в таблицу.

3.14 Построить график зависимости $\varepsilon_m = f(Z)$.

3.15 Проверить соответствие экспериментальной зависимости $B_m = f(Z)$ уравнению (1.3), используя метод линеаризации. Для этого, возведя (1.3) в степень $2/3$ и проведя ряд несложных математических операций выражение (1.3) можно представить в виде

$$B_m^{-2/3} = a \cdot Z^2 + b, \quad (3.1)$$

где a и b - некоторые постоянные величины.

Используя экспериментальные данные, построить график зависимости $B_m^{-2/3} = f(Z^2)$.

3.16 Рассчитать погрешность для $B_m^{-2/3}$ и Z^2 . Нанести на график доверительные интервалы для $B_m^{-2/3}$ и Z^2 .

3.17 Если точки зависимости $B_m^{-2/3}(Z^2)$ укладываются на прямую (в пределах их погрешностей), то экспериментальная зависимость $B_m(Z)$, учитывая (2.3), соответствует теоретической (1.3), т.е. закону Био – Савара – Лапласа.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1 Что такое магнитное поле?

4.2 Какое из проявлений магнитного поля используется при измерении магнитной индукции в данной работе?

4.3 Почему размеры измерительной катушки (ее поперечное сечение) должны быть значительно меньше, чем у витка с током, создающего магнитное поле?

4.4. По какому закону изменяется индукция магнитного поля на оси кругового тока? Записать этот закон.

4.5 Как проверить соответствие экспериментально измеренной зависимости $\varepsilon_m(Z)$ теоретической, т.е. закону Био – Савара – Лапласа?

4.6 Как определить направление вектора магнитной индукции $d\vec{B}$, создаваемого элементом тока $I d\vec{l}$ магнитного поля?

4.7 Изобразить графически магнитное поле, создаваемое круговым током и бесконечным прямым проводником с током.

4.8 Поперечные сечения четырех бесконечно длинных прямых проводников расположены в вершинах квадрата. Все токи одинаковой величины. Как должны быть направлены токи, чтобы:

- 1) магнитное поле в центре квадрата равнялось нулю;
- 2) результирующий вектор магнитной индукции был направлен по одной из диагоналей квадрата;
- 3) магнитное поле в центре квадрата было максимально возможным?

4.9 По двум взаимно перпендикулярным проводникам, расположенным в одной плоскости, текут токи одинаковой величины. В каких секторах могут быть точки, в которых индукция магнитного поля равна нулю (исключая точки в бесконечности)? Найти геометрическое место этих точек.

4.10 Центры поперечных сечений трех бесконечно длинных прямых проводников лежат на одной прямой и расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. По проводникам текут токи, одинаковые по величине. Нарисовать графическое изображение магнитного поля между проводниками для двух случаев:

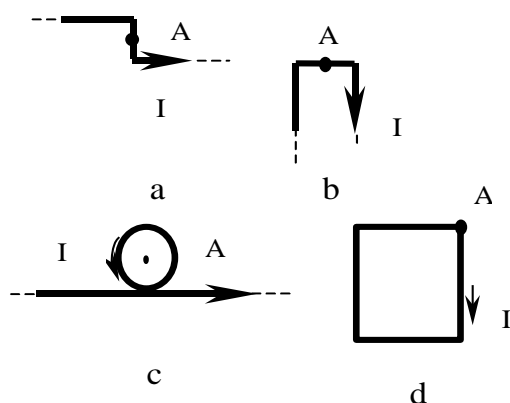
- 1) токи направлены одинаково;
- 2) крайние токи направлены одинаково. Указать точки на прямой, соединяющей центры сечений проводников, в которых поле минимальное, а в которых

максимальное.

4.11 По проводникам бесконечной длины текут постоянные токи одинаковой величины. Проводники изогнуты как показано на рисунках 4.1a – 4.1d.

- 1) Как направлен вектор магнитной индукции в точке A?
- 2) На каком из приведенных рисунков магнитное поле в точке A максимально, а на каком минимально?
- 3) На каком из приведенных рисунков магнитное поле в точке A может быть равно нулю?
- 4) На каком из приведенных рисунков магнитное поле в точке A направлено к нам?
- 5) На каком из приведенных рисунков магнитное поле в точке A направлено от нас?

Рисунок 4.1 – Проводники с током, создающие магнитное поле



4.12 Квадратная рамка со стороной a составлена из проводников конечной длины, по которым текут постоянные токи одинаковой величины. Как должны быть направлены токи в этих проводниках, чтобы в центре квадратной рамки результирующее магнитное поле было: а) максимально, б) равно нулю?

4.13 Круговые витки с током расположены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях так, что их центры совпадают. По величине токи и радиусы витков одинаковые. Вывести формулу для величины индукции результирующего магнитного поля в центре витков.

4.14 Круговой виток с током изогнут по диаметру под прямым углом. Вывести формулу для величины индукции результирующего магнитного поля в центре витка.

5 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

5.1 Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика : учебное пособие для вузов / И. В. Савельев. – 16-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 500 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/185339> (дата обращения: 10.04.2023)

5.2 Бурачевский Ю. А. Электричество и магнетизм: Учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе. 2018. 137 с. [Электронный ресурс]- Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7729>. (дата обращения: 10.04.2023)

5.3 Зенин, А. А. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике: Методические указания [Электронный ресурс] / А. А. Зенин. – Томск: ТУСУР, 2019. – 20 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8957>. (дата обращения: 10.04.2023).

5.4 Мухачев, В. А. Оценка погрешностей измерений: Методические указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / В. А. Мухачев. — Томск: ТУСУР, 2012. — 24 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1099> (дата обращения: 10.04.2023).