

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

А. А. Зенин, А. С. Климов

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КРУГОВОГО ТОКА

Методические указания
по выполнению компьютерной лабораторной работы
для студентов всех специальностей

Томск
2020

УДК 537.86
ББК 22.3
3 563

Рецензент
Воеводина О.В., д-р физ.-мат. наук, профессор

Одобрено на заседании каф. физики, протокол №83 от 06.03.2020.

Зенин, Алексей Александрович
3 563 Изучение магнитного поля кругового тока : метод. указания по выполнению компьютерной лабораторной работы / А. А. Зенин, А. С. Климов. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 16 с.

Представлена краткая теория по разделам физики магнитного поля на оси кругового тока и электромагнитной индукции. Показана связь между изменяющимся магнитным потоком пронизывающим контур и возникающей в этом контуре ЭДС индукции. Описана экспериментальная установка определения магнитного поля на оси кругового тока основанная на измерении ЭДС индукции в контуре, а также методика проведения измерений и обработки результатов.

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

УДК 537.86
ББК 22.3

©Зенин А. А., Климов А. С., 2020
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.....	4
2 МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ.....	6
3 ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	8
4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	11
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	13

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

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

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

Направлен вектор $d\vec{B}$ как вектор, равный векторному произведению 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} образуют 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 такие кривые, 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 движения рукоятки буравчика укажет направление линий магнитной индукции.

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

Векторы магнитной индукции \vec{B} , создаваемые разными элементарными токами $I d\vec{l}$, образуют конический веер, как показано на рисунке 1.1,б. 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. рисунок 1.1,а) равные по модулю

$$dB_z = dB \cdot \sin \beta = \frac{R}{r} dB.$$

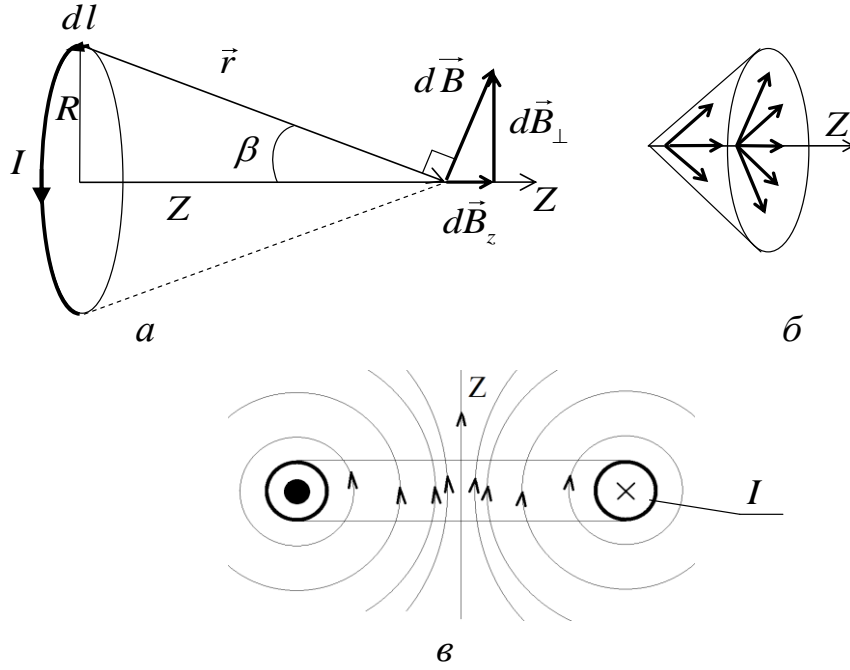


Рисунок 1.1 – Конфигурация магнитного поля, создаваемого круговым током

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

$$dB_z = \frac{R}{r} dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{IdlR}{r^3}. \quad (1.2)$$

Проинтегрировав выражение (1.2) по всему контуру и заменив r на $\sqrt{R^2 + Z^2}$ (см. рисунок 1.1,а), получим

$$B = \int dB_z = \frac{\mu_0 IR}{4\pi(R^2 + Z^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + Z^2)^{3/2}}. \quad (1.3)$$

Полученное выражение определяет величину индукции магнитного поля на оси кругового тока. Как следует из формулы (1.3), 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 (рисунок 1.1,в). При $Z = 0$ выражение (1.3) переходит в выражение для индукции магнитного поля в центре кругового тока

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (1.4)$$

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 (1.3), подставляя вместо тока I величину NI_0 .

Если катушка питается переменным синусоидальным током, то магнитное поле, создаваемое этой катушкой, 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, например эффект Холла, явление электромагнитной индукции, действие на магнитную стрелку и др. В данной работе использовано явление электромагнитной индукции. Оно 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 ЭДС индукции, прямо пропорциональная скорости изменения этого потока и числу витков:

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

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

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

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

где ω – круговая частота.

ЭДС индукции в измерительной катушке (рисунок 2.1) создается изменяющимся интегральным магнитным потоком Φ_n .

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 на несколько порядков меньше площади витка с током, создающего магнитное поле (см. рисунок 2.1).

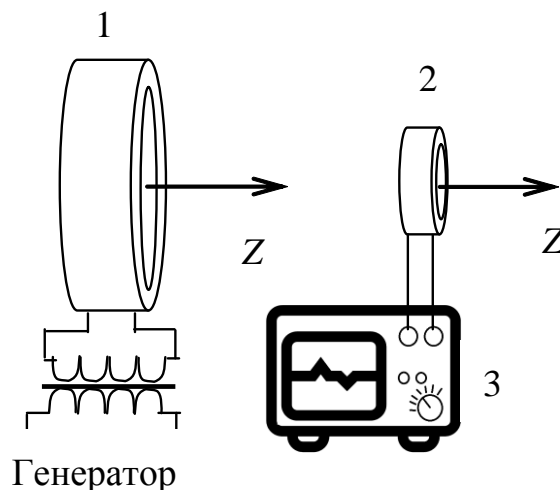


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение экспериментальной установки:

- 1 – катушка с током, создающая магнитное поле;
- 2 – измерительная катушка; 3 – измерительный прибор

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 ЭДС:

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

Таким образом, измерив ЭДС индукции и используя соотношение (2.3), можно рассчитать амплитудное значение индукции магнитного поля на оси катушки с током (см. рисунок 2.1). Измерение ЭДС индукции можно осуществить с помощью измерительного прибора, например милливольтметра, осциллографа или другого измерительного устройства. 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 ЭДС катушки в точке Z ;

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

ω – круговая частота, $\omega = 2\pi\nu$, где ν – частота переменного напряжения, питающего круговой виток;

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

Экспериментальная установка, схематично представленная на рисунке 2.1, состоит из катушки с током, создающей магнитное поле, измерительной катушки. Катушка с током питается через понижающий трансформатор переменным током. Все устройство смонтировано на лабораторном макете (рисунок 2.2).

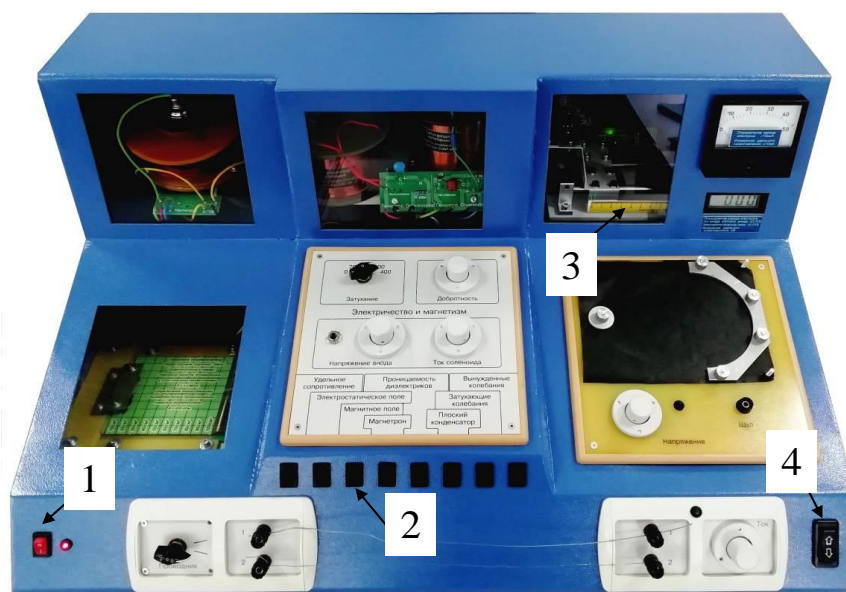


Рисунок 2.2 – Внешний вид макета:

- 1 – кнопка «Сеть»; 2 – панель выбора работы; 3 –линейка;
4 –тумблер перемещения измерительной катушки

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 кругового тока B_m на оси 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 (на экране компьютера после загрузки) на ярлыке папки «Лаборатория» щелкнуть дважды левой кнопкой мышки. В открывшемся окне выбрать из списка лабораторных работ «Изучение магнитного поля кругового тока» и по ней дважды щелкнуть левой кнопкой мышки. Во вновь открывшемся окне появится **стенд (панель)** данной работы, на котором расположены окно осциллографа с соответствующими маркерами, электронная таблица и набор кнопок управления (рисунок 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 $Z = 0$).

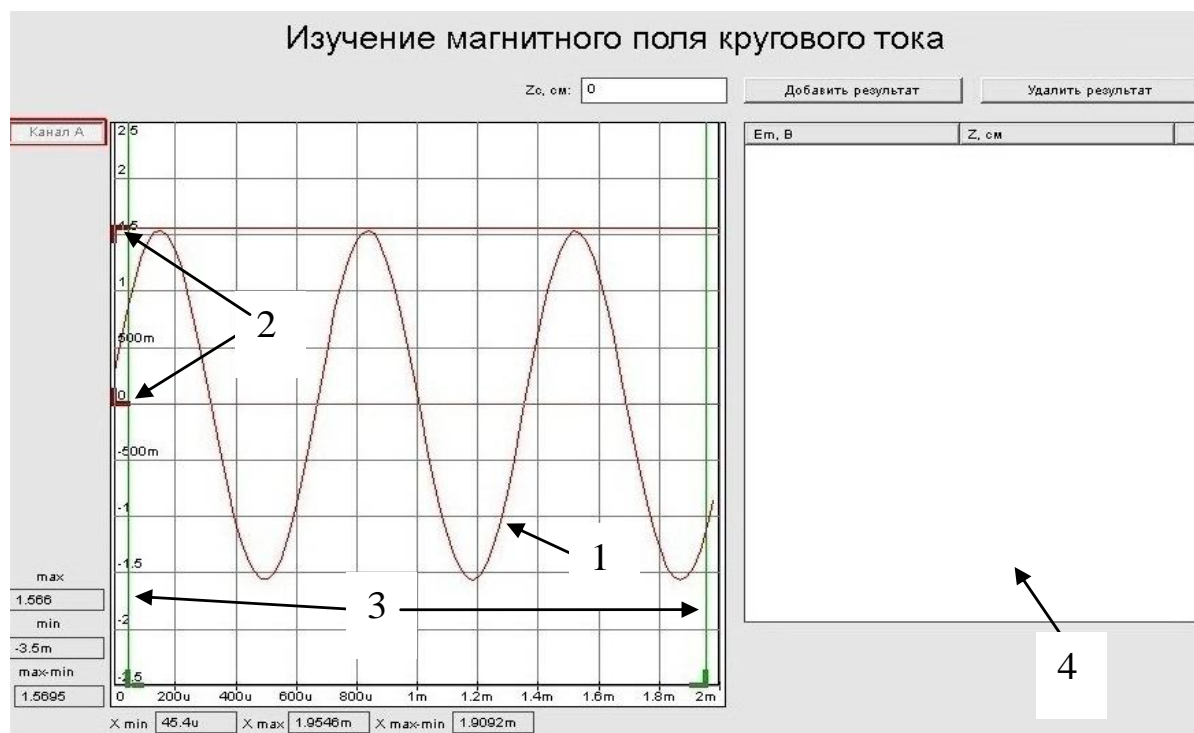


Рисунок 3.1 – Внешний вид окна лабораторной работы:

1 – окно осциллографа; 2 – горизонтальные измерительные маркеры;

3 – вертикальные измерительные маркеры;

4 – окно электронной таблицы

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

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. 3.5, 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: m – миллисекунды, μ – микросекунды). Записать полученное измерение в рабочую тетрадь. По значению периода определить круговую частоту $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$.

3.9 Показания электронной таблицы переписать в рабочую таблицу в тетради (таблица 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					
...					
6,5					

3.10 После записи данных в рабочую тетрадь закрыть все окна на экране компьютера, поставив указатель мышки на значок «Закрыть окно» в верхнем правом углу экрана и щелкнув левой кнопкой мышки.

3.11 Выключить компьютер. Для этого щелкнуть левой кнопкой мышки по расположенной в левом нижнем углу экрана кнопке «Пуск». В открывшемся меню щелкнуть левой кнопкой мышки по строчке «Завершить работу», а затем по кнопке «ОК».

3.12 Выключить питание макета, нажав кнопку «Сеть».

ВНИМАНИЕ! Включение и выключение питания макета при включенном компьютере может привести к зависанию компьютера.

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 уравнение (1.3) в степень $2/3$ и проведя ряд несложных математических операций, выражение (1.3) можно представить в виде

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

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 выражение (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?

4.3 Почему размеры измерительной катушки (ее поперечное сечение) должны быть значительно меньше, чем 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 стоком.

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

- 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 4.1.

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

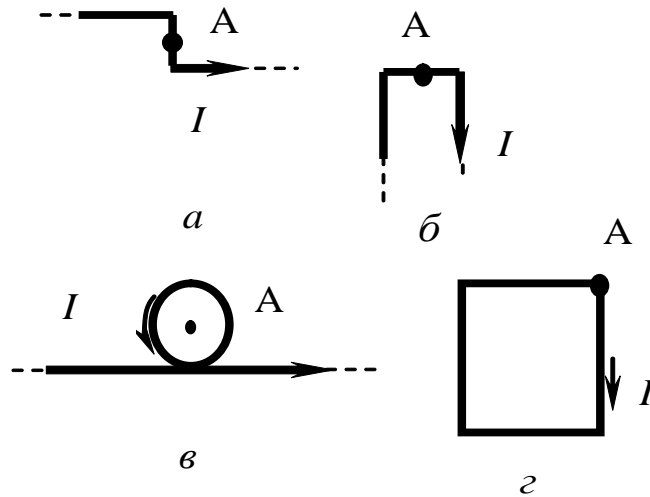


Рисунок 4.1 – Проводники с током, создающие магнитное поле

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.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Савельев И.В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика [Электронный ресурс] : учеб.пособие / И.В. Савельев. – Электрон.дан. – СПб. : Лань, 2018. – 500 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/98246>. –Загл. с экрана. [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/98246> (дата обращения: 03.06.2020.)

2 Бурачевский Ю. А. Электричество и магнетизм: учеб.-метод. пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе[Электронный ресурс]/ Ю. А. Бурачевский. – 2018. – 137 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7729> (дата обращения: 03.06.2020.)

3 Чужков Ю.П.Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе по физике/ Ю. П. Чужков, А. А. Зенин. – Томск, 2019. – 21с.

4 Мухачев В. А. Оценка погрешностей измерений [Электронный ресурс]: метод.указания к лабораторной работе / В. А. Мухачев, А. Л. Магазинников. – Томск : Томск.гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 24 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1099>, вход свободный (дата обращения: 03.06.2020.)