

Тема 15

Взаимодействие токов. Магнитное поле. Индукция и напряженность магнитного поля. Виток с током в магнитном поле. Закон Био - Савара - Лапласа. Магнитное поле прямого, кругового и соленоидального токов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

15.1. Взаимодействие токов

15.2. Магнитное поле. Индукция и напряженность магнитного поля

15.3. Виток с током в магнитном поле

15.4. Закон Био - Савара - Лапласа. Магнитное поле прямого, кругового и соленоидального токов

15.1. Взаимодействие токов

Изучение природы магнитных явлений началось с рассмотрения естественного магнетизма. Это взаимодействие естественных магнитов происходило и с некоторыми веществами, которые относятся к классу ферромагнетиков. В дальнейшем мы увидим, что взаимодействие остается таким же, если один из естественных магнитов заменен на проводник с током (опыт Эрстеда), и, наконец, можно наблюдать это явление, если взаимодействуют два проводника с током (опыт Ампера).

Опыт 15.1 Опыт Эрстеда.

Оборудование:

1. Магнитная стрелка;
2. Источник тока В-24;
3. Проводник ;

Ход работы:

- 1.Собируем установку рис.15.1.
- 2.Стрелка первоначально параллельна проводнику.
- 3.При включении источника тока стрелка устанавливается перпендикулярно проводнику.
- 4.При отключении источника тока стрелка возвращается в исходное положение.

Вывод: вокруг проводника с током существует магнитное поле, т.е. там, где есть движущиеся электрические заряды, существует магнитное поле.

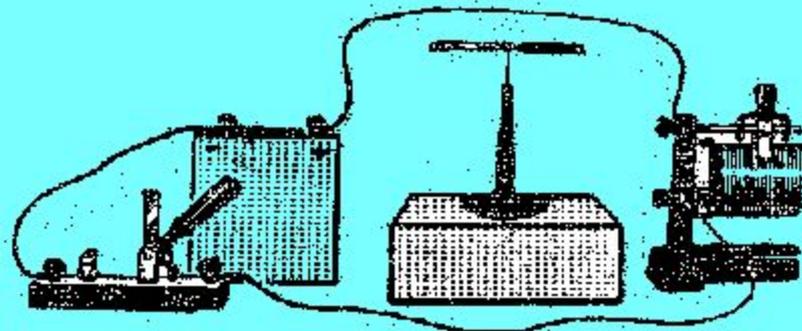


Рис.15.1.

Опыт 15.2 Взаимодействие двух проводников с током.

Оборудование:

1. Две ленты гибкие из фольги;
2. Источник тока В-24;
3. Проводник;

Ход работы:

1. Собираем установку рис.15.2.
2. Токи направлены противоположно — проводники при этом отталкиваются.
3. Токи сонаправлены — при этом проводники притягиваются.

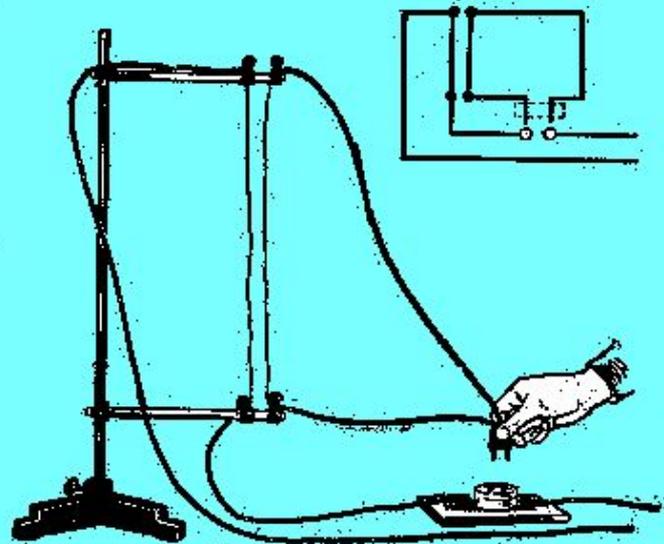


Рис. 15.2.

Вывод: при взаимодействии двух проводников с током возникают силы, которые отталкивают или притягивают проводники.

Изучение магнитных явлений показало, что магнитное взаимодействие наблюдается тогда, когда имеет место перемещение электрических зарядов по отношению к наблюдателю (или регистрирующему прибору). Поскольку все явления, связанные с относительным движением объектов, называются релятивистскими (от английского слова “relative” – относительный), то говорят, что магнетизм – это релятивистский эффект.

15.2. Магнитное поле. Индукция и напряженность магнитного поля

Магнитное поле — форма существования материи, обладающая свойством передавать магнитное взаимодействие. Вокруг движущихся зарядов свойства среды изменяются, среда передает магнитное взаимодействие, причем скорость передачи конечна.

Для исследования магнитного взаимодействия используют пробный контур с током.

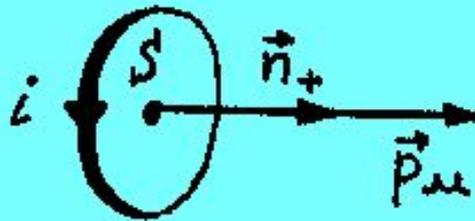


Рис.15.3.

$$\vec{p}_M = iS\vec{n}_+, \quad |\vec{p}_M| = iS \quad (15.1)$$

Магнитный момент \vec{p}_M — вектор, который равен произведению i и S и совпадает по направлению с положительной нормалью \vec{n}_+

Пусть имеется магнитное поле, в некоторой точке А которого помещается пробный контур с током. Пробный контур с током — такой контур, который не создает заметных искажений исходного поля.

Контур с током в магнитном поле будет разворачиваться, т.к. на него действует вращательный момент. Величина вращательного момента, действующего на контур с током, зависит от взаимной ориентации контура и поля.

На контур действует некоторый максимальный вращательный момент:

$$\frac{M_{\max_1}}{P_{M_1}}, \quad \frac{M_{\max_2}}{P_{M_2}}, \quad \dots, \quad \frac{M_{\max_k}}{P_{M_k}}$$

СОСТАВИМ ОТНОШЕНИЯ ТИПА

Величина $\frac{M_{max}}{\rho_M}$ для данной точки постоянна, поэтому ее можно выбрать в качестве характеристики магнитного поля.

$$B = \frac{M_{max}}{\rho_M} - \text{магнитная индукция} \quad (15.2)$$

Магнитная индукция — физическая величина, численно равная максимальному вращательному моменту, действующему на пробный контур с единичным магнитным моментом, помещенным в данную точку поля.

Магнитная индукция в СИ измеряется в Тесла (Тл)

$$[B] = \frac{[M_{max}]}{[\rho_M]} = \frac{H \cdot M}{A \cdot M^2} = \frac{кг \cdot м \cdot м}{с^2 \cdot A \cdot м^2} = \frac{кг}{с^2 \cdot A}$$

Магнитная индукция — это вектор, а вращательный момент выражается как векторное произведение

$$\begin{aligned}\vec{M} &= \vec{p} \times \vec{B} \\ M &= pB \sin \alpha\end{aligned}\tag{15.3}$$

Кроме магнитной индукции для характеристики магнитного поля электрического тока (поля в вакууме) используется понятие вектора напряженности магнитного поля, который определяется по формуле

$$H = \frac{\vec{B}}{\mu_0}\tag{15.4.}$$

15.3. Виток с током в магнитном поле

Можно рассчитать работу, которая совершается при повороте контура на угол α

$$dA = Md\alpha \Rightarrow$$

$$A = \int_0^{\alpha} Md\alpha = \int_0^{\alpha} p_M B \sin\alpha d\alpha = -p_M B \cos\alpha \quad (15.5)$$

По закону сохранения и превращения энергии совершенная работа идет на изменение потенциальной энергии контура с током в магнитном поле.

$$W = -p_M B \cos\alpha = -\underline{p_M} \underline{B} \quad (15.6)$$

Графическая иллюстрация.

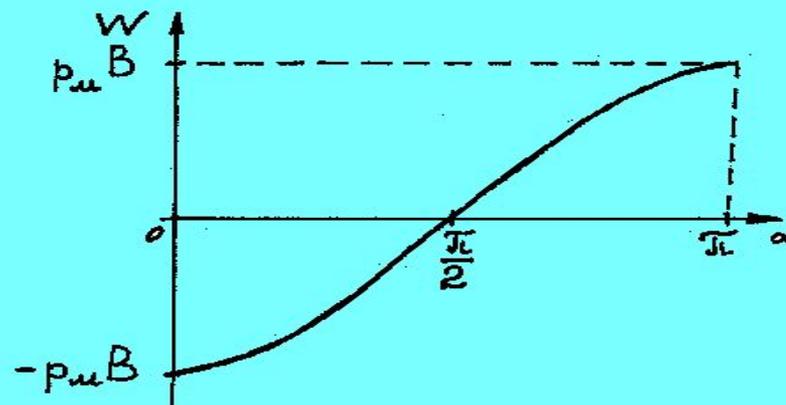


Рис.15.4.

Используя принцип минимума потенциальной энергии можно сказать, что контур с током устанавливается в таком положении, когда его потенциальная энергия взаимодействия с магнитным полем минимальна. Значит, вектор магнитного момента контура установится вдоль вектора магнитной индукции.

$$\alpha = 0, \quad \vec{p}_M \uparrow \uparrow \vec{B}, \quad W = W_{\min}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2}, \quad \vec{p}_M \perp \vec{B}, \quad W = 0$$

$$\alpha = \pi, \quad \vec{p}_M \uparrow \downarrow \vec{B}, \quad W = W_{\max}$$

Также как и электрическое поле, магнитное можно изобразить с помощью силовых линий — линий магнитной индукции.

Геометрия поля будет зависеть от формы проводника с током, но число силовых линий, пронизывающих единичную площадку нормальную к ним, всегда численно равно значению индукции в данной точке.

Опыт 15.3. Демонстрация спектров магнитного поля тока

Оборудование:

1. Набор приборов для проецирования спектров магнитного поля тока.
2. Коробочка - сито с железными опилками.
3. Проекционный аппарат.
4. Батарея аккумуляторов.
5. Проводники соединительные.
6. Лист бумаги.

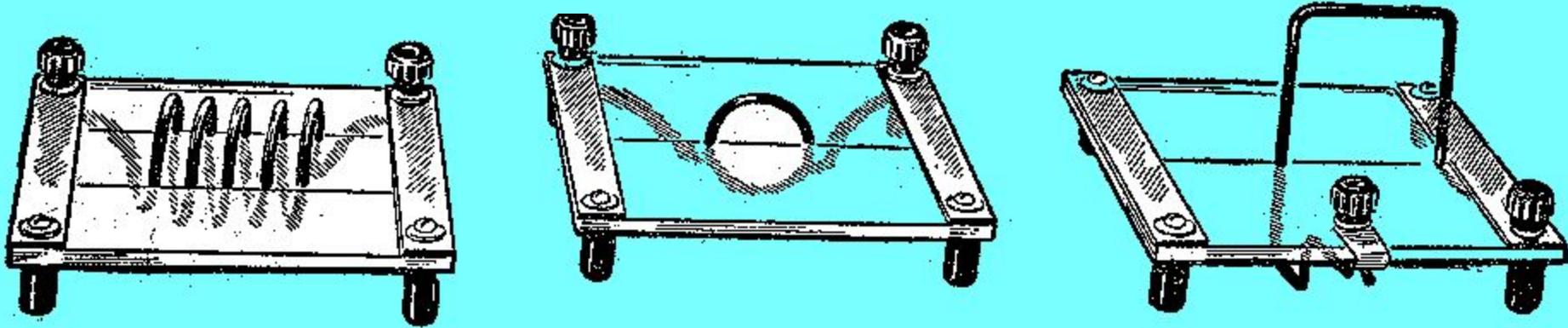


Рис. 15.5.

Ход работы:

1. Один из таких приборов устанавливают на оправу конденсора проекционного аппарата, настроенного для горизонтального проецирования, и равномерно посыпают небольшим количеством мелких железных опилок.

2. Затем зеркалом или призмой направляют изображение прибора на экран и передвиганием объектива получают необходимую резкость изображения опилок.

3. Присоединив к зажимам прибора провода от источника, включают ток. Под действием магнитного поля часть опилок, преодолевая трение, располагается вдоль силовых линий и образует спектр. Если после этого слегка постучать по панели концом карандаша, то опилки встряхиваются и спектр становится более отчетливым. Спектр, полученный на экране, изображен на рисунке 15.6.

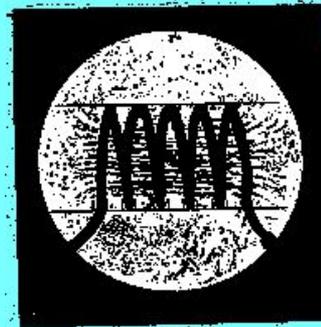
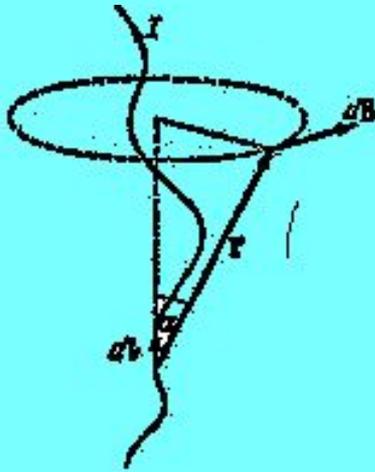


Рис.15.6.

15.4. Закон Био - Савара - Лапласа. Магнитное поле прямого, кругового и соленоидального токов.

Значение магнитной индукции для любого проводника определяется законом Био - Савара - Лапласа.



$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i |dl \times r|}{r^3} \quad (15.7)$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{idl \sin \alpha}{r^2} \quad (15.8)$$

Рис.15.7.

Вектор \vec{dB} всегда перпендикулярен плоскости, построенной на векторах \vec{dl} и \vec{r} и

С помощью закона Био - Савара - Лапласа рассчитаем магнитную индукцию поля прямого и кругового тока.

1. Поле прямого тока.

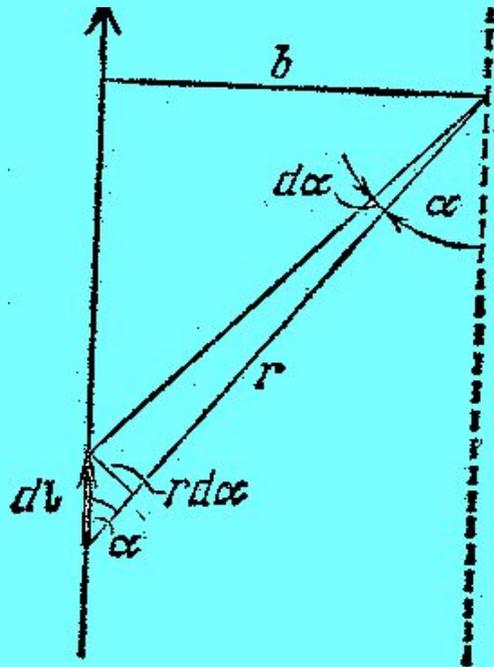


Рис.15.8.

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0}$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r_0} \quad (15.9)$$

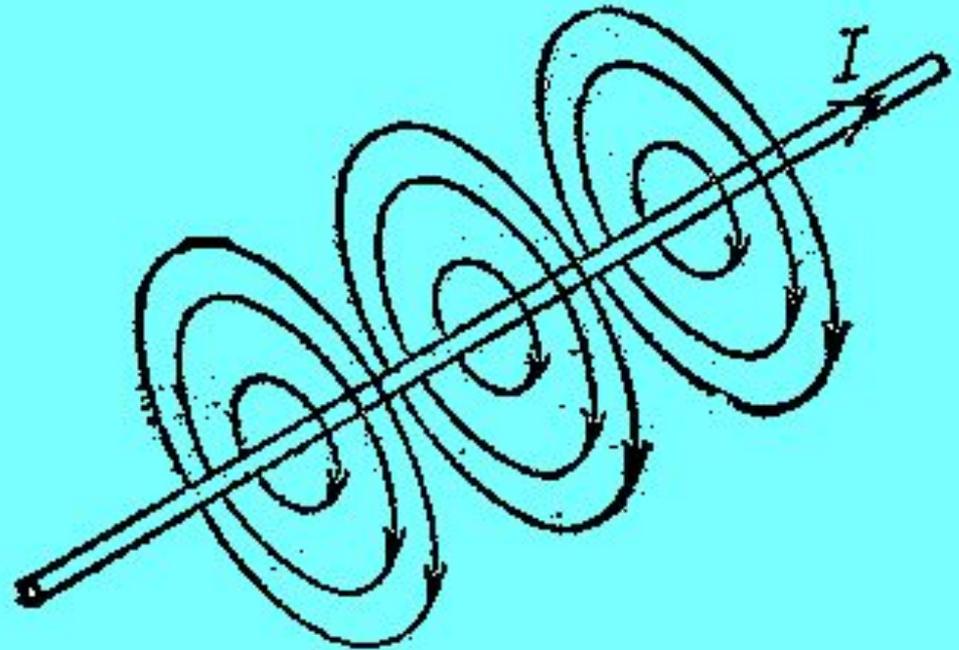


Рис.15.9.

2. Поле на оси кругового тока.

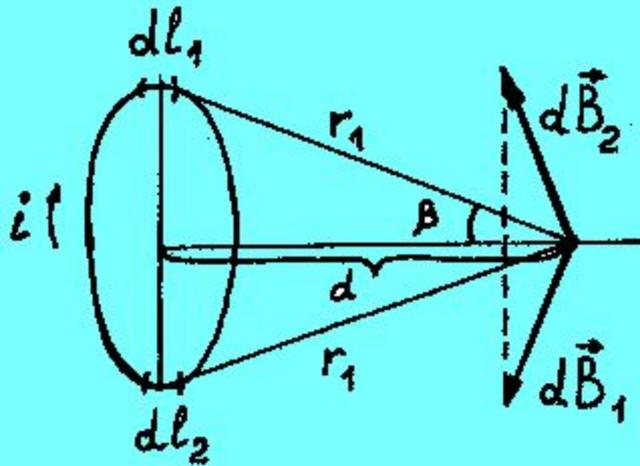


Рис. 15.10.

Рассмотрим индукции \vec{dB}_1 и \vec{dB}_2 создаваемых двумя элементами контура dl_1 и dl_2 . Т. к. угол между r и dl равен 90° , то $\sin 90^\circ = 1$.

Закон Био - Савара - Лапласа для двух элементов

$$dB_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{idl_1}{r_1^2}; dB_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{idl_2}{r_2^2}.$$

Выбрав $dl_1 = dl_2$ и замечая $r_1 = r_2$, получим

$$dB_1 = dB_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{idl}{r^2}.$$

$$\begin{aligned} d\vec{B} &= d\vec{B}_1 + d\vec{B}_2 \Rightarrow dB = \\ &= dB_1 \sin \beta + dB_2 \sin \beta = 2dB_1 \sin \beta = \\ &= 2dB_1 \frac{R}{r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2idl}{r^3}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= \int_0^l \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2iR}{r^3} dl = \frac{\mu_0 Ri}{4\pi r^3} \cdot 2 \int_0^l dl = \\ &= \frac{\mu_0 Ri}{4\pi r^3} \cdot 2\pi R = \frac{\mu_0 R^2 i}{2(R^2 + r^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

В частности при $r=0$ имеем $B = \frac{\mu_0 i}{2R}.$

[← К оглавлению](#)