

Тема 4. Магнитные явления¹

Лабораторная работа № 7 (2.9 + 2.10)

Измерение характеристик магнитных полей

Введение

Магнитное поле — силовое поле. Оно действует на движущиеся электрические заряды (сила Лоренца), проводники с током (сила Ампера) и на тела, обладающие собственной или индуцированной намагниченностью.

Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции \vec{B} . Величина вектора \vec{B} зависит от магнитных свойств среды. Поэтому в качестве характеристики магнитных полей часто используют величину, называемую напряженностью магнитного поля \vec{H} , которая не зависит от свойств среды. Магнитная индукция связана с напряженностью магнитного поля соотношением $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$, где μ -магнитная проницаемость среды и μ_0 -магнитная постоянная (в системе СИ $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м).

Распределение магнитного поля в пространстве принято изображать в виде совокупности силовых линий, касательная к которым в каждой точке совпадает с направлением вектора \vec{B} (или \vec{H}), а густота линий косвенно говорит о величине \vec{B} в разных точках пространства.

Магнитные поля создаются движущимися зарядами, токами в проводниках и магнитами - телами, обладающими собственной намагниченностью. Максимальная густота силовых линий (максимальное \vec{B}) наблюдается вблизи двух определенных точек на поверхности магнита, названных его полюсами.

Земной шар представляет собой гигантский магнит. Индикатором наличия магнитного поля Земли со времен Древнего Китая служит магнитная стрелка. В свободном состоянии она устанавливается в направлении юг - север. Концы стрелки получили соответствующие названия: северный и южный. За положительное направление силовой линии вектора магнитной индукции было принято направление из северного конца магнитной стрелки, то есть силовые линии выходят из северного полюса любого магнита и входят в южный полюс.

Силы взаимодействия двух магнитов стремятся установить их так, чтобы направления силовых линий совпадали. Поэтому оказалось, что на севере Земли находится южный геомагнитный полюс, а на юге — северный геомагнитный полюс. Эта терминологическая путаница, впрочем, не мешает использовать магнитную стрелку для ориентации на поверхности Земли. Но оказалось, что положения географических и геомагнитных полюсов Земли не совпадают, то есть точное направление на географический полюс и направление, указываемое магнитной стрелкой, несколько отличаются. Угол между этими направлениями α называется магнитным *склонением* или углом

¹ Подготовлено преподавателями КОЭФ Александровым В.Н. и Сёмашем В.Д.

магнитного склонения. Для различных точек на поверхности Земли он неодинаков и увеличивается по мере приближения к полюсам, что необходимо учитывать при решении навигационных задач.

Плоскость, проходящая через вектор напряженности и магнитные полюсы Земли, называют *плоскостью магнитного меридиана*, а линию ее пересечения с поверхностью Земли – *магнитным меридианом*.

Проекцию вектора напряженности на горизонталь, лежащую в плоскости магнитного меридиана, называют *горизонтальной составляющей* напряженности магнитного поля Земли. Для Москвы $H_{\Gamma} = 16$ А/м.

Угол наклона магнитной стрелки к горизонтали называют *углом магнитного наклона* β . Величина β зависит от географической широты места наблюдения, меняясь от нуля на экваторе до 90° на магнитном полюсе. Для Москвы $\beta = 70^{\circ}$.

Экспериментальные задачи, поставленные в работе:

- измерение напряженности магнитного поля Земли в точке наблюдения (г. Москва),
- измерение и расчет магнитной индукции поля, создаваемого внутри соленоида,
- построение теоретических и экспериментальных зависимостей магнитной индукции от положения точки измерения внутри соленоида и от силы тока в его обмотке.

Описание экспериментальных установок

При выполнении данной работы используются несколько установок.

Горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли \vec{H}_{Γ} измеряется при помощи *тангенс-буссоли* (рис. 7.1), представляющей собой вертикальную рамку с током, в центре которой расположена собственно буссоль - магнитная стрелка, способная поворачиваться в горизонтальной плоскости и снабженная лимбом - шкалой для отсчета угла поворота стрелки.

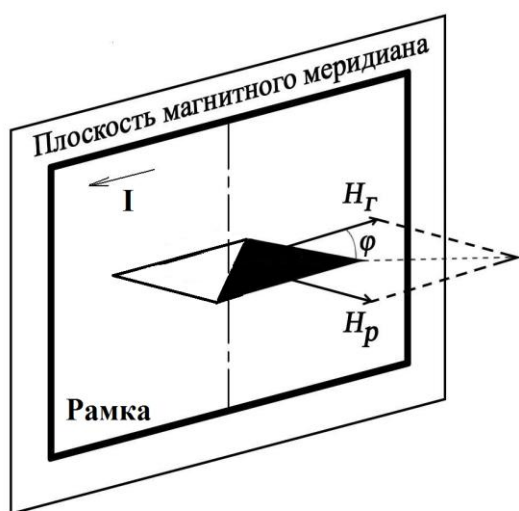


Рис. 7.1.

$H_{\Gamma} = H_{\rho} / \operatorname{tg} \varphi$. Величина H_{ρ} может быть рассчитана по формуле:

$$H_p = 2\sqrt{2} N I / \pi L, \quad (1)$$

где N - число витков в рамке, I - сила тока, протекающего в рамке, L - длина стороны рамки. Рамка подключается к выпрямителю при помощи двойного перекидного ключа K (рис. 7.2). Это позволяет изменять направление тока в рамке, чтобы исключить ошибку, связанную с неточностью исходного положения рамки. Сила тока рамки I измеряется миллиамперметром (мА) и может изменяться реостатом (R).

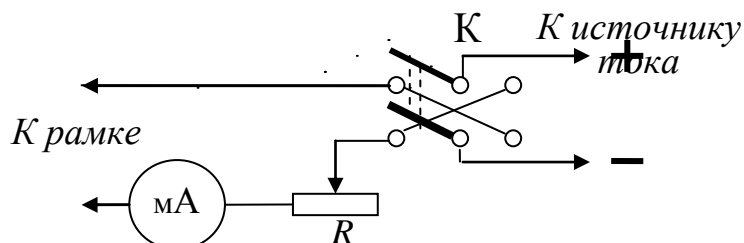


Рис. 7.2.



Рис. 7.3.

Угол магнитного наклона β измеряется при помощи *инclinатора* (см. рис. 7.3), который также представляет собой магнитную стрелку на оси, снабженную круговой шкалой, но плоскость стрелки со шкалой может быть установлена как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости.

Очевидно, что напряженность магнитного поля Земли $H_z = H_T / \cos \beta$.

Во второй части работы проводятся измерения величины магнитной индукции в различных точках вдоль оси длинной катушки с током (соленоида). Для этого используется прибор для измерения магнитного потока Φ – веберметр (ВМ) (см. рис.7.4). Он подключен к измерительной катушке ИК. Величина B определяется из соотношения $\Phi = B S N$, где Φ - магнитный поток, пронизывающий площадку измерительной катушки площадью S ; N - число витков измерительной катушки.

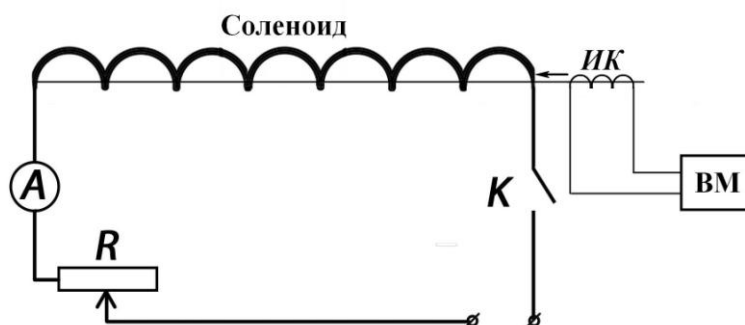


Рис. 7.4.

Измерительная катушка закреплена на подвижном стержне и помещена внутрь соленоида. Положение катушки определяется по линейке, вдоль которой движется стрелка, прикрепленная к стержню.

При включении (или выключении) тока через соленоид магнитный поток изменяется на $\Delta\Phi = \Phi$ (от 0 до Φ и наоборот). В силу закона электромагнитной индукции это приводит к появлению ЭДС

$$\varepsilon = - d\Phi/dt \quad (2)$$

и соответственно тока в измерительной цепи $I=\varepsilon/R$ (где R - сопротивление измерительной цепи). Подставив в (2) $\varepsilon = IR = R dq/dt$ и интегрируя это выражение по времени, получим $q = \Delta\Phi / R = \Phi/R$, то есть магнитный поток в измерительной катушке и заряд, протекающий в ней, пропорциональны друг другу.

Веберметр проводит измерение мгновенных значений индукционного тока, его интегрирование и пересчет заряда в магнитный поток, значения которого отсчитываются по шкале прибора.

Подготовка протокола к работе

Запишите в тетради номер и название работы.

Запишите заголовок: **Расчетные формулы.**

Запишите заголовок: **«Задание 1. Измерение напряженности магнитного поля Земли».**

Выпишите формулы (с расшифровкой обозначений) для расчета H_3 , H_T , а также H_p в виде $H_p = K_1 I$, где $K_1 = 2\sqrt{2}N/\pi L$. При выполнении расчетов нужно вначале рассчитать K_1 на основе паспортных данных установки и затем использовать его при последующих вычислениях, что позволит их заметно ускорить.

Запишите формулу для расчета относительной инструментальной погрешности определения H_T : $\varepsilon = [(\Delta I / I)^2 + (\Delta\varphi / \cos^2\varphi)^2]^{0,5}$, где ΔI и $\Delta\varphi$ – приборные ошибки измерений силы тока и угла отклонения магнитной стрелки буссоли, соответственно.

Запишите заголовок: **«Задание 2. Измерение и расчет индукции магнитного поля, создаваемого внутри соленоида».**

Запишите формулу для определения экспериментальных значений B :

$$B_{\text{экс}} = \Phi / (SN). \quad (3)$$

Выпишите формулу для расчетов магнитной индукции:

$$B_{\text{теор}} = \mu\mu_0 \frac{nI}{2} \left(\frac{l-x}{\sqrt{R^2+(l-x)^2}} + \frac{x}{\sqrt{R^2+l^2}} \right), \quad (4)$$

где n – число витков на единицу длины соленоида; I - сила тока в обмотке соленоида, l – длина соленоида; x – расстояние от края соленоида до

исследуемой точки; R – радиус соленоида.

Запишите (4) в виде $B_{теор} = K_2 \left(\frac{l-x}{\sqrt{R^2+(l-x)^2}} + \frac{x}{\sqrt{R^2+l^2}} \right)$ и отдельно выражение для $K_2 = \mu\mu_0 \frac{nI}{2}$. Как и при выполнении задания 1 такая форма записи позволяет ускорить вычисления.

Запишите (4) в виде $B_{теор} = K_3 I$ и отдельно выражение для

$$K_3 = \mu\mu_0 \frac{nI}{2} \left(\frac{l-x}{\sqrt{R^2+(l-x)^2}} + \frac{x}{\sqrt{R^2+l^2}} \right) \text{ при } x = l/2.$$

Используйте эту форму записи при последующих вычислениях.

Запишите заголовок: «**Задание 1**».

Подготовьте таблицу 1 для записи результатов измерений $H_{Г}$.

Таблица 1

$I, \text{ А}$	$\varphi_{\text{ЛЕВ}}$	$\varphi_{\text{ПР}}$	$\varphi_{\text{СР}}$	$\text{tg}\varphi_{\text{СР}}$	$H_{Г}, \text{ А/м}$	$\cos\varphi$	ε

После получения теоретического допуска к работе *приступайте* к ее выполнению.

Указания по выполнению работы

Выпишите паспортные данные установки (N и L), необходимые для выполнения **Задания 1**.

Соберите измерительную цепь в соответствии с рис. 7.2.

После проверки преподавателем или инженером *установите* плоскость рамки в плоскости магнитного меридиана, то есть вдоль магнитной стрелки.

Включите источник питания и *переведите* ключ **К** в левое положение. При помощи реостата установите силу тока так, чтобы магнитная стрелка отклонилась на угол 35° . *Запишите* в таблицу 1 полученные значения силы тока и угла отклонения стрелки. *Переведите* ключ в правое положение и проведите отсчет угла отклонения стрелки в другую сторону. *Проведите* такие же измерения для углов 45° и 50° .

Рассчитайте величину $H_{Г}$ для каждого измерения и среднее значение, которое используйте в последующих расчетах H_3 .

Выпишите значения ΔI и $\Delta\varphi$ и рассчитайте относительную ошибку ε для

каждого измерения.

Выпишите значение угла φ , при котором относительная ошибка ε минимальна.

Подготовьте таблицу 2 для записи показаний инклинометра.

Таблица 2

№ измерения	φ (сев)	φ (юж)	$\varphi_{\text{ср}}$
1			
2			
3			
Среднее значение $\varphi_{\text{ср}}$			

Чтобы уменьшить влияние посторонних магнитных полей, *установите* инклинометр на верхней полке лабораторного стола подальше от других приборов, особенно от источников напряжения. *Установите* плоскость инклинометра горизонтально. Поворачивая инклинометр в горизонтальной плоскости, *установите* нулевое деление шкалы напротив северного конца магнитной стрелки.

Поверните плоскость инклинометра в вертикальное положение. *Произведите* отсчет угла β по положениям северного и южного концов стрелки. *Запишите* среднее из этих значений.

Проведите три подобных измерения в разных местах стола. В качестве окончательного результата возьмите среднее из полученных значений.

Рассчитайте модуль H_3 .

Запишите заголовок «**Задание 2**».

Соберите цепь питания соленоида (рис. 9.4), соединив последовательно источник питания, соленоид, реостат, ключ и амперметр.

Включите питание соленоида и *установите* ток, равный 1А. *Разомкните* ключ в цепи питания соленоида. *Подготовьте* таблицу 3.

Таблица 3

x , см	Φ , мкВб			$B_{\text{ЭКС}}$, Тл	$B_{\text{ТЕОР}}$, Тл
	Вкл.	Выкл.	Ср.		
0					
l					

Установите измерительную катушку в крайнее левое положение ($x = 0$).

Пригласите инженера для проверки схемы, получения практического допуска и настройки веберметра (включения прибора и установки нуля). При

этом переключатель «диапазон» должен быть в положении 2500мкВб.

Проведите в присутствии инженера первую серию измерений.

Отожмите кнопку «АРР». *Нажмите* кнопку «ИЗМЕРЕНИЕ».

Замкните ключ питания соленоида. *Произведите* отсчет по шкале прибора, *запишите* результат в таблицу 3 в столбце «вкл».

Разомкните ключ питания соленоида. *Произведите* отсчет по шкале прибора, *запишите* результат в таблицу 3 в столбце «выкл». *Нажмите* кнопку «НУЛЬ».

Проведите аналогичные измерения по всей длине соленоида. При этом рекомендуется менять положение измерительной катушки в интервале от 0 до 7см каждый раз на 1см, в интервале от 8 до 42см – через 10см, в интервале от 43 до 50см – через 1см. После всех измерений *нажмите* кнопку «АРР».

Установите измерительную катушку в среднее положение и подготовьте таблицу 4 для записи результатов. Эта таблица аналогичная таблице 3 с той разницей, что в первом столбце нужно записывать вместо координаты x величину силы тока I в соленоиде, которую нужно изменять от 1А до 0,2А через каждые 0,2А. *Проведите* измерения Φ для всех значений силы тока.

Внимание! После каждого измерения, прежде чем изменять силу тока через соленоид необходимо нажимать кнопку АРР.

Выпишите паспортные данные соленоида (n, l, R).

Рассчитайте средние значения магнитного потока, а затем теоретические и экспериментальные значения B и *запишите* их в таблицы 3 и 4.

По данным таблиц 3 и 4 *постройте* графики зависимостей теоретических и экспериментальных значений B от x на одном листе и от I на другом.

Дополнительный материал по теме 4

Силы магнитного взаимодействия нашли широкое применение на практике, в частности, в конструкции электроизмерительных приборов.

У приборов *магнитоэлектрической системы* подвижная часть измерительного механизма (рис. 7.5) состоит из рамки B – плоской легкой прямоугольной катушки, которая может вращаться в зазоре между неподвижным стальным цилиндром A и полюсами постоянного магнита ($N'S'$). Рамка укреплена на двух полуосях, и к ней жестко прикреплена стрелка C .

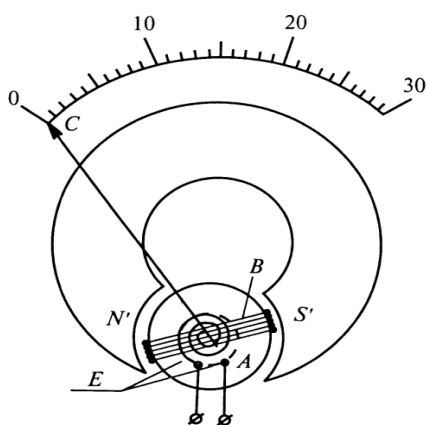


Рис. 7.5.

В зазоре между концами магнита и стальным цилиндром создается постоянное магнитное поле с индукцией \vec{B} . Концы обмотки катушки

соединяются со спиральными пружинами E , через которые подводится измеряемый ток.

Взаимодействие магнитного поля и рамки с током (сила Ампера) приводит к возникновению момента сил, поворачивающего рамку и вместе с ней стрелку. Величина этого момента пропорциональна силе тока в рамке.

Поворот рамки вызывает закручивание пружин E , в которых возникает противодействующий момент упругих сил M_p , пропорциональный углу закручивания (поворота рамки) α .

При равенстве этих моментов стрелка прибора останавливается. В этом случае $\alpha = C_1 I$, где C_1 – постоянная прибора, которая зависит от конструкции прибора и определяет цену деления прибора. Отсюда следует, что величина тока может быть определена по углу поворота измерительного механизма α .

Магнитное поле в зазоре, где поворачивается рамка с током, обычно достаточно велико, поэтому даже слабый ток вызывает значительный вращающий момент, а внешние магнитные поля практически не вносят погрешности в результат измерения.

К достоинствам приборов магнитоэлектрической системы можно отнести равномерность шкалы; высокую чувствительность; малое потребление энергии из измеряемой цепи; нечувствительность к внешним магнитным полям. К недостаткам – возможность измерения только постоянного тока; чувствительность измерительного механизма к электрическим перегрузкам и внешним механическим воздействиям.

Измерительный механизм электромагнитной системы (рис. 7.6) состоит из неподвижной катушки A и подвижного ферромагнитного сердечника B , укрепленного эксцентрично на одной оси со стрелкой прибора C . К этой же оси прикреплен один из концов спиральной пружины E , создающей при ее закручивании противодействующий момент сил.

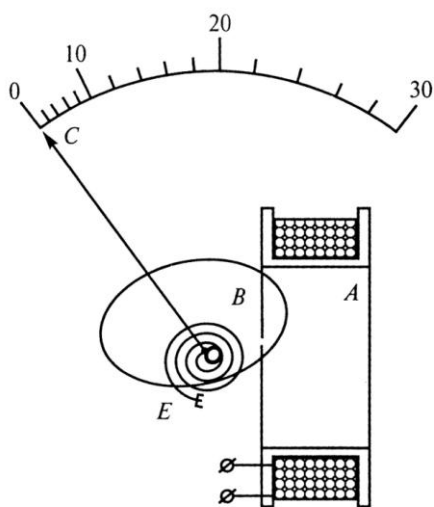


Рис. 7.6.

Под действием магнитного поля, создаваемого измеряемым током I , протекающим через катушку, сердечник поворачивается, втягиваясь в катушку и стремясь расположиться так, чтобы энергия системы была минимальна. Так как энергия магнитного поля катушки пропорциональна квадрату силы тока, протекающего через нее, то можно считать, что возникающий при этом вращающий момент будет зависеть от силы тока квадратично.

Если момент, обусловленный взаимодействием магнитного поля и тока, равен моменту упругих сил пружины E , то стрелка останавливается, В этом

случае $\alpha = C_2 I^2$, где C_2 – постоянная прибора, которая зависит от конструкции прибора и определяет цену деления прибора. Отсюда следует, что величина тока может быть определена по углу поворота измерительного механизма α . Поскольку угол поворота стрелки прибора α пропорционален квадрату силы тока то шкала приборов этой системы неравномерна в отличие от магнитоэлектрических.

Поскольку угол поворота стрелки прибора не зависит от направления тока (т.к. он пропорционален квадрату силы тока), то такие приборы пригодны для измерения как постоянного, так и переменного тока.

Измерительный механизм таких приборов оказался весьма чувствительным к внешним магнитным полям, проникающим внутрь катушки, так как поле катушки может быть довольно небольшим. Поэтому для защиты от внешних магнитных полей используется либо железный экран, либо астатическое устройство механизма.

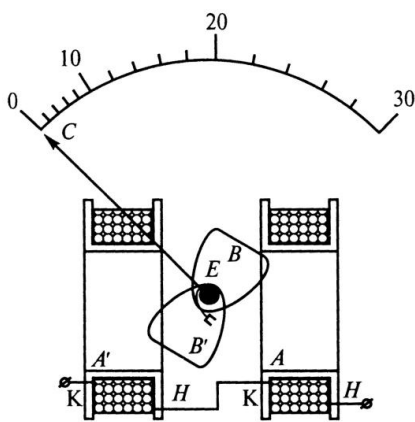


Рис. 7.7.

В астатическом приборе (рис. 7.7) имеются две одинаковые катушки, расположенные с двух сторон от оси с двумя сердечниками. Катушки намотаны так, что поле одной направлено противоположно полю другой. Внешнее поле, усиливая действие одной катушки, ослабляет действие другой и в результате практически не оказывает влияния на показания прибора.

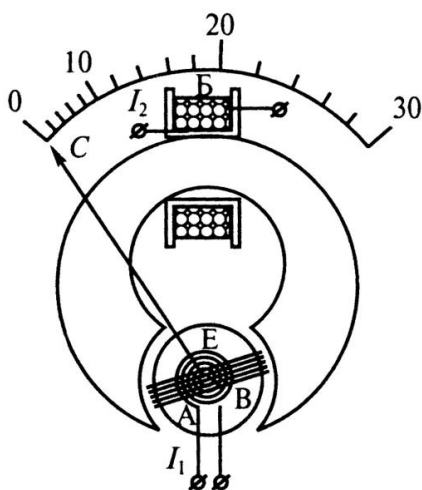


Рис. 7.8.

Устройство приборов электродинамической системы аналогично устройству магнитоэлектрических приборов за тем исключением, что магнитное поле, в котором поворачивается рамка с током B , создается неподвижной катушкой A (рис. 7.8).

В этом случае вращающий момент, действующий на подвижную катушку, зависит как от силы тока в неподвижной катушке I_1 , так и от силы тока в подвижной катушке I_2 : $M = KI_1 I_2 \cos \varphi$, где φ - сдвиг фаз между силами токов I_1 и I_2 . Так же, как в других приборах, спиральная пружина E обеспечивает возникновение противоположного момента сил что приводит к пропорциональности угла поворота α катушки B произведению $I_1 I_2$.

Если катушки соединить последовательно и подать на них измеряемый ток, то угол поворота стрелки будет пропорционален квадрату силы тока.

Таким образом, приборы рассмотренных систем по своей сути являются амперметрами.

Но приборы электродинамической системы могут быть использованы и для измерения полезной мощности, выделяющейся в цепи (нагрузке). В этом случае обмотку неподвижной катушки (обычно ее сопротивление R_H много больше сопротивления нагрузки R) нужно включить параллельно нагрузке, то есть как вольтметр. Подвижную катушку (сопротивление R_H которой обычно много меньше R) подключают последовательно с нагрузкой, то есть как амперметр. Тогда угол поворота стрелки будет пропорционален мощности, потребляемой нагрузкой, так как
$$\alpha \sim I_1 I_2 = (U/R_H) I_2 \sim UI_2 = P.$$

Рекомендуемая литература:

2. Е.М. Гершензон, Н.Н. Малов, А.Н. Мансуров. Курс общей физики. Электродинамика. §§ 7.1, 7.4, 9.11. – М., Академия, 2001.

3. С.Г. Калашников. Электричество. §§ 76, 78, 80,81,85. 7-е изд., стереот. – М.: Физматлит, 2008.

4. Д.В. Сивухин. Общий курс физики, т.3, Электричество. §§ 55, 125. М.: Физматлит, 2006.

Примерные контрольные вопросы по теме 4

1. Как узнать направление силовых линий магнитного поля, создаваемого проводником с током?
2. Как узнать направление силовых линий магнитного поля, создаваемого катушкой (рамкой или соленоидом), если известно направление тока в ней?
3. Как узнать направление силовых линий магнитного поля по положению магнитной стрелки?
4. Нарисуйте картину силовых линий магнитного поля Земли и покажите на ней, как изменяется значение угла магнитного склонения при изменении координаты точки наблюдения.
5. Нарисуйте схематически вид Земли со стороны полюса, укажите на ней положения географического и геомагнитного полюсов и покажите, как изменяется угол магнитного склонения при изменении координаты точки наблюдения (широты – при перемещении по радиусу и долготы – при перемещении по окружности).
6. Нарисуйте картину силовых линий магнитного поля, создаваемого соленоидом.
7. Каков физический смысл B и H ? В каких единицах они измеряются?
8. Что такое магнитная проницаемость μ ?

9. Как классифицируются вещества в зависимости от значения μ ?
10. Какие ферромагнетики называют магнитомягкими?
11. Из каких ферромагнетиков могут быть изготовлены постоянные магниты?
12. Что такое сила Лоренца?
13. Что такое сила Ампера?
14. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
15. Как установилась бы стрелка электроизмерительного прибора в отсутствии спиральных пружин?
16. Почему приборы магнитоэлектрической системы не могут использоваться в цепях переменного тока?
17. Как осуществляется компенсация влияния внешних магнитных полей в приборах электромагнитной системы?
18. Как по условным обозначениям на шкале измерительного прибора определить, к какой системе он относится?
19. Почему у приборов электродинамической системы при измерениях силы тока шкала неравномерна, а при измерениях мощности – равномерна?
20. Где больше цена деления шкалы приборов магнитоэлектрической системы – в начале или в конце шкалы?