

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Методические указания к виртуальной лабораторной работе по физике

Екатеринбург

Составители: В. В. Лобанов, В. С. Гущин, В. С. Саввин
Научный редактор: проф., д. ф.-м. н. Ф. А. Сидоренко

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ
Методические указания к виртуальной
лабораторной работе по курсу «Физика» для
студентов для студентов всех форм
обучения всех специальностей.
Екатеринбург: УрФУ, 13 с.

В работе приведены рекомендации по определению вертикальной и горизонтальной составляющих индукции магнитного поля Земли.

Подготовлено кафедрой физики.

© ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», 2013

1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Как известно, Земля окружена магнитным полем. Изучение его имеет чрезвычайно важное практическое и научное значение. Точное знание составляющих магнитного поля Земли играет весьма важную роль в навигации, при поисках месторождений железной руды и других полезных ископаемых.

Это поле, как и всякое другое магнитное поле, в каждой точке характеризуется вектором магнитной индукции \vec{B} . Геомагнетизм порождается электрическими токами, текущими в проводящем ядре Земли и обусловленными долготными течениями зарядов вместе с наружными слоями расплавленной периферической части ядра со скоростями около 0,1 см/с относительно мантии. С периодичностью в 200...300 тысяч лет происходит переполюсовка (смена полярности) геомагнитного поля. Сложную картину магнитного поля Земли в первом приближении можно представить полем однородного намагниченного шара, магнитный момент которого направлен под углом $11,5^\circ$ к оси вращения Земли (рис.1).

Вектор \vec{B} магнитного поля Земли в любой точке земной поверхности лежит в вертикальной плоскости, которую называют плоскостью магнитного меридиана этой точки. Плоскость магнитного меридиана проходит через магнитные полюсы Земли. Именно в этой плоскости ориентируется свободная магнитная стрелка (например, стрелка компаса).

Так как вектор индукции магнитного поля Земли в любой точке земного шара, кроме точек магнитного экватора, образует с горизонтальной плоскостью угол, отличный от нуля и называемый магнитным наклоном (см. рис.1), его можно разложить на две составляющие: горизонтальную \vec{B}_h и вертикальную \vec{B}_v . Магнитное наклонение (φ_0) определяется как $\arctg\left(\frac{B_v}{B_h}\right)$.

Целью настоящей работы является изучение магнитного поля Земли, а именно определение его горизонтальной и вертикальной составляющих. Оказывается, изучить составляющие магнитного поля Земли можно с помощью метода, в основе которого лежит явление электромагнитной индукции.

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Явление электромагнитной индукции состоит в том, что в проводящем контуре при изменении потока вектора магнитной индукции, сцепленного с этим контуром, возбуждается электродвижущая сила – ЭДС индукции.

Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея ЭДС индукции, возникающая в контуре, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, сцепленного с контуром, и противоположна ей по знаку:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt},$$

где ε_i – ЭДС индукции; t – время; Φ – поток вектора магнитной индукции сквозь поверхность, опирающуюся на контур; $d\Phi/dt$ – скорость изменения потока вектора магнитной индукции.

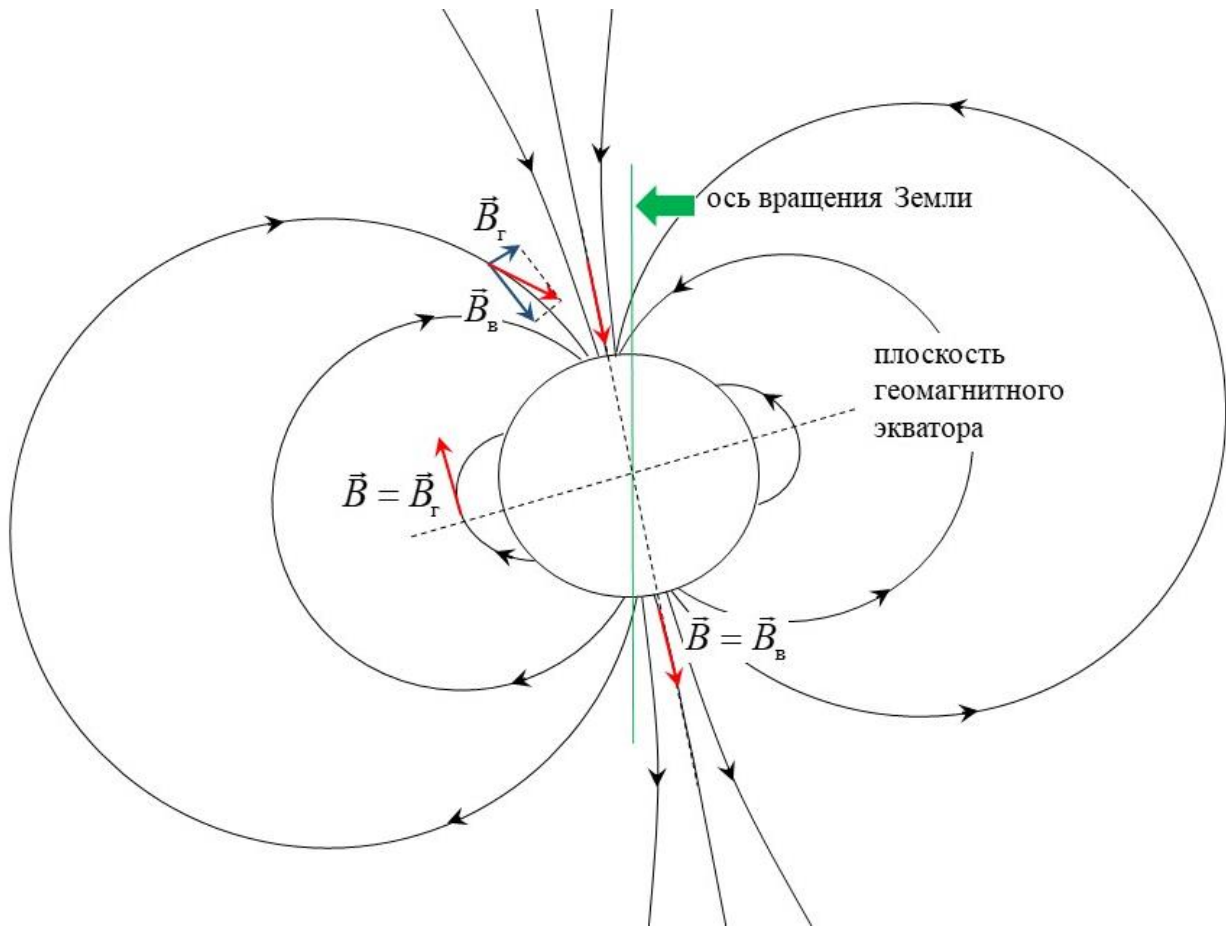


Рис.1. Магнитное поле Земли: N и S - магнитные полюсы

Поток вектора магнитной индукции Φ – скалярная физическая величина, определяемая выражением

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S},$$

где \vec{B} – вектор магнитной индукции в месте нахождения элемента поверхности dS , вектор $d\vec{S}$ направлен по нормали к элементу поверхности dS ; $\vec{B} \cdot d\vec{S} = B \cdot dS \cdot \cos(\vec{B}, d\vec{S})$ – скалярное произведение этих двух векторов. Интегрирование проводится по всей поверхности, опирающейся на контур.

Для данного контура в данном поле поток Φ не зависит от формы и размеров поверхности, опирающейся на контур. Поэтому для расчета Φ удобно строить простейшую поверхность. Например, поток Φ однородного магнитного поля B , сцепленный с плоской рамкой площадью S , рассчитывается по формуле

$$\Phi = BS \cdot \cos \alpha,$$

где S – площадь рамки; α – угол между направлением поля и нормалью к плоскости рамки.

Пусть проводящий контур представляет собой катушку, содержащую N витков провода, намотанного на плоскую рамку площадью S . Площадь поверхности, которую пронизывают линии магнитного поля, в N раз больше площади одного витка. Поэтому магнитный поток сквозь катушку равен

$$\Phi = BNS \cdot \cos \alpha.$$

Пусть катушка вращается с угловой скоростью ω вокруг оси, лежащей в плоскости катушки, а B – составляющая магнитной индукции постоянного однородного магнитного поля, перпендикулярная оси вращения катушки. Тогда угол α изменяется со временем по закону:

$$\alpha = \omega t = 2\pi \frac{t}{T},$$

где T – период вращения катушки. В катушке возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} BNS \cdot \cos \alpha = -BNS \frac{d}{dt} \cos \omega t = BNS\omega \cdot \sin \omega t,$$

которая, как следует из полученной формулы, изменяется со временем по гармоническому закону.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ИНДУКТОРА

При вращении рамки в постоянном магнитном поле в ней возникает ЭДС индукции. Если концы рамки подключить к внешнему сопротивлению R , то в такой электрической цепи потечет индукционный ток. Его величина в произвольный момент времени равна

$$i = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{N\omega BS}{R} \sin \omega t.$$

Индукцию постоянного магнитного поля можно определить, если измерить мгновенное значение ЭДС индукции или силы индукционного тока (при известных N, ω, S, R).

Вместо измерения мгновенного значения ЭДС индукции (или силы индукционного тока) легче определить их средние значения за половину периода $T/2$

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \langle N\omega BS \sin \omega t \rangle,$$

но по теореме о среднем значении

$$\langle \sin \omega t \rangle = \left(\frac{T}{2} \right)^{-1} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t dt = \frac{2}{T} \frac{\cos \omega t}{\omega} \bigg|_0^{\frac{T}{2}} = \frac{2}{\pi},$$

следовательно,

$$\langle \varepsilon_i \rangle = N \frac{2\pi}{T} BS \frac{2}{\pi} = \frac{4BSN}{T}, \quad (1)$$

откуда

$$B = \frac{\langle \varepsilon_i \rangle T}{4SN}. \quad (2)$$

Здесь T – период вращения индуктора; S и N – соответственно площадь поперечного сечения и число витков катушки.

Индуктор – это плоская катушка, состоящая из большого числа последовательно соединенных витков провода, которая может свободно вращаться относительно фиксированной в пространстве оси. Ориентация последней определяется условиями конкретной задачи. На рис.2 показан индуктор, содержащий один виток. Для получения знакопостоянной ЭДС индукции (или индукционного тока одного направления) концы обмотки индуктора (в данном случае – одного витка) соединены с двумя изолированными друг от друга полукольцами (коллектором) (рис.2).

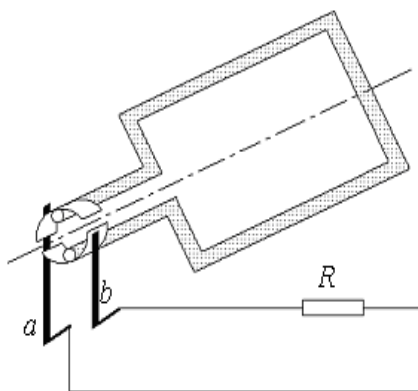


Рис. 2. Электрическая схема выпрямления индукционного тока

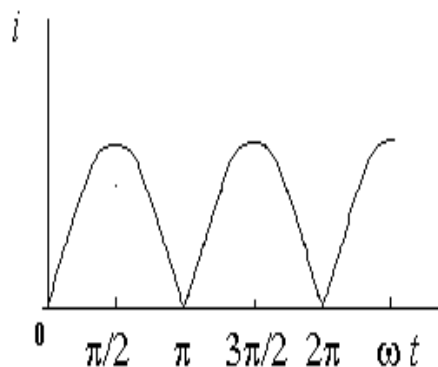


Рис. 3. Временная зависимость индукционного тока

При такой конструкции индуктора щетки a и b будут попеременно касаться то одного, то другого полукольца, при этом в цепи потечет ток переменной величины, но одного направления (рис. 3). Среднее значение пульсирующего индукционного тока зависит от среднего значения $\langle \varepsilon_i \rangle$ и от полного сопротивления электрической цепи – R (см. рис.2).

Среднее значение ЭДС индукции $\langle \varepsilon_i \rangle$ определяется методом компенсации. Для этого индуктор присоединяют к двум точкам C и D цепи, питаемой от источника постоянного тока (рис. 4). Разность потенциалов U_{CD} , созданная источником тока ε на участке CD , должна скомпенсировать ЭДС индукции, возникающую в индукторе при его вращении в магнитном поле. Условие компенсации достигается подбором скорости вращения индуктора.

При наличии компенсации ток в индукторе отсутствует, что зафиксируется гальванометром Г. Средняя ЭДС индукции при этом по абсолютной величине равна разности потенциалов, существующей между точками С и D:

$$\langle \varepsilon_i \rangle = U_{CD}. \quad (3)$$

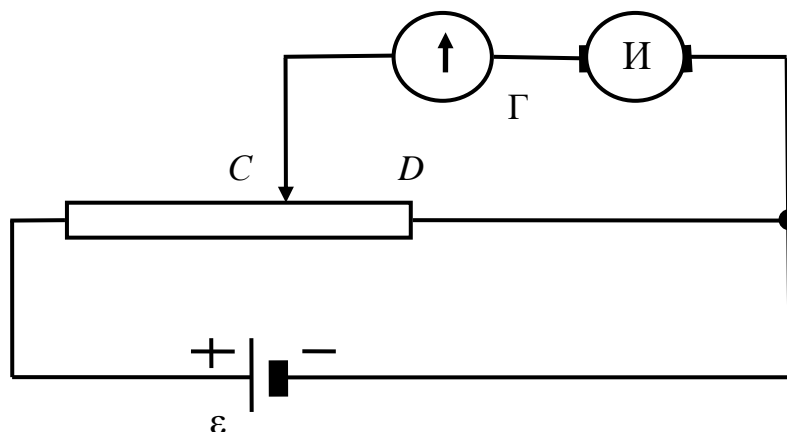


Рис. 4. Электрическая схема метода компенсации

Так как участок CD однородный, разность потенциалов на его концах равна произведению сопротивления участка на ток в нем:

$$U_{CD} = Ir.$$

Следовательно,

$$\langle \varepsilon_i \rangle = Ir. \quad (4)$$

Подставив в (2) выражение (4), получим расчетную формулу для вычисления индукции магнитного поля:

$$B = \frac{IrT}{4d^2 N}, \quad (5)$$

где d^2 - площадь поперечного сечения индуктора, выраженная через сторону квадрата d ; остальные обозначения прежние.

Для измерения горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли индуктор, очевидно, следует вращать вокруг вертикальной оси (рис.5), а для измерения вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли - вокруг горизонтальной оси (рис. 6). Именно в таких положениях индуктора поток вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли в первом случае и горизонтальной составляющей во втором будут неизменными и равными нулю.

Понятно, что расчетной формулой для определения обеих составляющих магнитного поля Земли будет выражение (5). Таким образом, достаточно, в соответствии с условием компенсации ЭДС индукции, измерить период вращения индуктора при определенном положении оси вращения последнего, и мы получим абсолютные значения горизонтальной и вертикальной составляющих индукции магнитного поля Земли

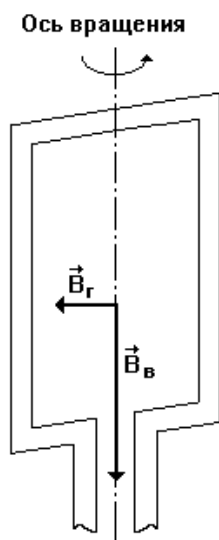


Рис. 5. Положение индуктора при изучении горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли

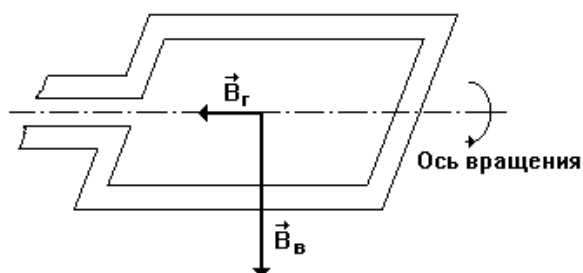


Рис.6. Положение индуктора при изучении вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли

Электрическая схема установки представлена на рис. 7. Основная цепь состоит из источника постоянного тока ε , реостата R , магазина (или набора) сопротивлений r , микроамперметра μA и ключа K_1 . Цепь индуктора содержит индуктор $И$, нуль-гальванометр Γ , магазин (или набор) сопротивлений r и ключ K_2 .

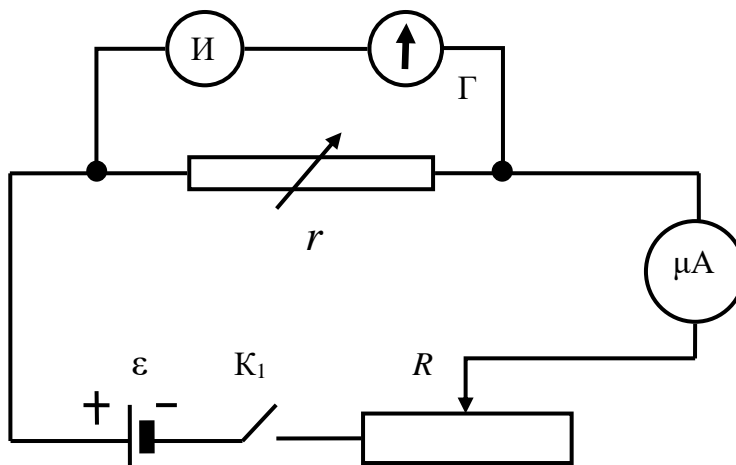


Рис. 7. Электрическая схема установки для изучения магнитного поля Земли

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. После запуска программы для перехода к определению горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли щелкнуть кнопку «исследование горизонтальной составляющей»; ось вращения индуктора установится вертикально (см. рис.5).
2. Замкнуть ключ K1, щелкнув на нем левой кнопкой мыши. Щелкнуть левой кнопкой мыши на ползунке реостата R и, удерживая кнопку нажатой, установить ток микроамперметра равным 10 мкА (чтобы измерить ток микроамперметра наведите указатель мыши на изображение микроамперметра).
3. Замкнуть ключ K2, щелкнув на нем левой кнопкой мыши. Нажать кнопку «вверх» на клавиатуре, чтобы начать вращение индуктора в одном из направлений. Повторно нажимая кнопку «вверх» увеличивать частоту вращения индуктора, при этом наблюдая за показаниями гальванометра. Если показания гальванометра не уменьшаются, нажимайте кнопку «вниз» на клавиатуре для постепенного уменьшения частоты и перехода к вращению индуктора в противоположном направлении. После того, как индуктор сменит направление вращения, для увеличения частоты нажимать кнопку «вниз» на клавиатуре.
4. Добившись уменьшения показаний гальванометра, продолжайте увеличивать частоту до тех пор, пока показания гальванометра не будут представлять собой малые колебания около нулевого значения.
5. Запустить секундомер, щелкнув левой кнопкой мыши на его изображении, при этом одновременно начать считать число оборотов индуктора. Отсчитать по секундомеру 40 оборотов и занести показания секундомера в табл.1. Опыт повторить 5 раз, и после каждого опыта показания секундомера заносить в табл. П. 2 отчета.
6. Перейти к определению вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли, для чего щелкнуть левой кнопкой мыши на кнопке «назад в меню», а затем в меню выбрать пункт «исследование вертикальной составляющей»; ось вращения индуктора расположится горизонтально (см. рис.6)
7. Замкнуть ключ K1, щелкнув на нем левой кнопкой мыши. Щелкнуть левой кнопкой мыши на ползунке реостата R и, удерживая кнопку нажатой, установить ток микроамперметра равным 30 мкА (чтобы измерить ток микроамперметра наведите указатель мыши на изображение микроамперметра).
8. Прodelать операции, аналогичные описанным в п. 3-5. Результаты измерений занести в табл. П. 3 отчета.
9. Используя полученные данные, рассчитать в каждом отдельном опыте период вращения индуктора. Соответствующие значения для горизонтальной и вертикальной составляющих впишите в табл. П2 и П3. Найти среднее значение периода вращения индуктора при определении

горизонтальной и вертикальной составляющих индукции магнитного поля Земли. Рассчитать квадраты отклонений периода вращения индуктора в каждом опыте от среднего значения и найти их сумму для каждой составляющей в отдельности (см. табл.1 и 2).

Необходимые постоянные установки:

$$r=(320\pm1) \text{ Ом}$$

$$N=1000$$

$$d=(27,0\pm0,3) \text{ см}$$

5. РАСЧЕТ СОСТАВЛЯЮЩИХ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ГРАНИЦ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ

По формуле (5) с использованием средних значений периода рассчитайте горизонтальную и вертикальную составляющие индукции магнитного поля Земли: $\langle B_z \rangle$ и $\langle B_\theta \rangle$.

Затем вычислите границы погрешности результата измерения составляющих индукции магнитного поля Земли в относительной форме по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta_B}{\langle B \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_r}{r}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\langle r \rangle}}{\langle T \rangle}\right)^2}, \quad (6)$$

где $\Delta_I, \Delta_r, \Delta_d, \Delta_{\langle T \rangle}$ - границы полных погрешностей, которые следует рассчитывать так:

$$\Delta_x = \sqrt{\theta_x^2 + \varepsilon_x^2}, \quad (7)$$

где θ_x - доверительная граница неисключенной систематической погрешности; ε_x - доверительная граница случайной погрешности результата измерения величины X .

Согласно теории вероятностей, граница неисключенной систематической погрешности равна

$$\theta_X = 1,1\sqrt{\theta_{осн}^2 + \theta_{отсч}^2 + \theta_M^2}, \quad P=0,95, \quad (8)$$

где $\theta_{осн}$ - рассчитывается по классу точности прибора по формуле

$$\theta_{осн} = x_{\max} \frac{\delta}{100}, \quad (9)$$

где δ - класс точности прибора; x_{\max} - верхний предел измерения прибором (или номинальное значение); $\theta_{отсч}$ - погрешность отсчитывания, принимаемая равной половине цены деления шкалы; θ_M - погрешность метода (если она существенна, то будет задана, в противном случае принимается равной нулю).

Доверительная граница случайной погрешности находится по формуле

$$\varepsilon_x = t_{p,n} S_{\langle x \rangle}, \quad (10)$$

где $t_{p,n}$ - коэффициент Стьюдента зависит от принятой доверительной вероятности P и числа измерений n (в данной лабораторной работе $n=5$, $P=0,95$, а $t_{0,95;5} = 2,77$); $S_{\langle x \rangle}$ - среднеквадратическое отклонение среднего арифметического, рассчитываемое как

$$S_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}}, \quad (11)$$

под $\langle x \rangle$ - понимается среднее арифметическое измеряемой величины, а под x_i - результат i - го наблюдения.

Граница полной погрешности измерения силы тока I будет определяться только границей неисключенной систематической погрешности (принимая, что $\varepsilon_I = 0$):

$$\Delta_I = \theta_I = 1,1 \sqrt{\left(I_{\max} \frac{\delta}{100}\right)^2 + \left(\frac{C}{2}\right)^2},$$

где I_{\max} - предел измерений по шкале микроамперметра; δ - класс точности микроамперметра; C - минимальная цена деления шкалы прибора.

При вычислении границы полной погрешности в измерении сопротивления r также полагаем $\varepsilon_r = 0$. Положим равной нулю и погрешность отсчитывания, поскольку исключаем промахи при установке требуемого сопротивления. Следовательно,

$$\Delta_r = \theta_r = r \frac{\delta}{100}, \quad P = 0,95,$$

где δ - класс точности магазина сопротивлений; r - номинальное значение сопротивления, установленного на магазине. Если вместо магазина в схеме использован набор сопротивлений, то Δ_r задается в карточке на установке (именно этот случай реализован в настоящей виртуальной работе).

Граница полной погрешности в определении геометрических размеров индуктора Δ_d не рассчитывается, она приводится в рекомендуемых данных.

Границу полной погрешности измерения периода вращения индуктора следует рассчитывать с учетом доверительных границ как случайной, так и систематической погрешности. В первую очередь оцените границу систематической погрешности, которая определяется исключительно погрешностью отсчитывания временного интервала и может быть рассчитана по соотношению

$$\theta_{\langle T \rangle} = \langle T \rangle \frac{\Delta_t}{t_{\min}}, \quad P = 0,95,$$

где $\langle T \rangle$ - среднее значение периода для данной составляющей; Δ_t - граница полной погрешности отсчитывания временного интервала ($\Delta_t = C/2$, здесь C - минимальная цена деления шкалы секундомера); t_{min} - минимальный временной интервал при изучении соответствующей составляющей (см. табл. 1 и 2).

Далее рассчитайте среднее квадратическое отклонение для каждой составляющей в отдельности по формуле (11) и сравните его с соответствующим значением доверительной границы систематической погрешности:

-если $\theta_{\langle T \rangle} / S_{\langle T \rangle} < 8,0$, то систематической погрешностью по сравнению со случайной пренебрегают и принимают, что граница погрешности результата измерения периода $\Delta_{\langle T \rangle} = \varepsilon_{\langle T \rangle}$;

- если $\theta_{\langle T \rangle} / S_{\langle T \rangle} > 8,0$, то случайной погрешностью по сравнению с систематической пренебрегают и принимают, что граница погрешности результата измерения равна $\Delta_{\langle T \rangle} = \theta_{\langle T \rangle}$;

- если $0,8 < \theta_{\langle T \rangle} / S_{\langle T \rangle} < 8,0$, то необходимо учитывать обе составляющие погрешности измерения. В этом случае доверительную границу погрешности результата оцените по формуле (7).

Полученные значения для Δ_I , Δ_r , Δ_d и Δ_T подставьте в формулу (6) и произведите расчет γ .

Найдите границы абсолютной погрешности результатов измерений горизонтальной и вертикальной составляющих индукции магнитного поля Земли:

$$\Delta_B = \gamma \langle B \rangle, \quad P=0,95.$$

Напоминаем, что погрешности окончательного результата должны быть выражены одной значащей цифрой.

Окончательный результат:

$$\begin{aligned} B_{\Gamma} &= \langle B_{\Gamma} \rangle \pm \Delta_{B_{\Gamma}}, \text{ Тл,} & P=0,95; \\ B_{\text{в}} &= \langle B_{\text{в}} \rangle \pm \Delta_{B_{\text{в}}}, \text{ Тл,} & P=0,95. \end{aligned}$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется индукцией магнитного поля \vec{B} ?
2. Что называется магнитными силовыми линиями? Каковы их свойства?
3. Как на планете Земля расположены магнитные полюсы и каков вид магнитных силовых линий?
4. Что такое плоскость магнитного меридиана?
5. Как ориентируется стрелка компаса в геомагнитном поле?
6. Что такое вертикальная и горизонтальная составляющие земного магнитного поля?

7. Что называется: а) магнитным потоком Φ ? б) потокоцеплением Ψ ?
8. В чем состоит явление электромагнитной индукции ? Записать закон ЭМИ Фарадея.
9. Как направлен электрический ток в замкнутом проводящем контуре ? Сформулировать правило Ленца. Записать закон Фарадея с учетом Правила Ленца.
10. Получить выражение для ЭДС индукции (ε_i) при вращении с угловой частотой ω плоской рамки площадью S с числом витков N в однородном магнитном поле индукцией B .
11. Что представляет собой индуктор ? Каким образом можно получить знакопостоянную ε_i ?
12. Записать формулу для среднего значения $\langle \varepsilon_i \rangle$.
13. В чем суть метода компенсации при определении среднего значения ЭДС индукции $\langle \varepsilon_i \rangle$? Изобразить электрическую схему метода компенсации.
14. Изобразить электрическую схему установки для изучения магнитного поля Земли.
15. Как должен быть сориентирован индуктор для определения горизонтальной составляющей земного магнитного поля B_r ? Каково при этом значение угла α между вертикалью и осью вращения индуктора?