

Работа №

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Земля обладает магнитным полем (рис. 1), которое обнаруживается, в частности, по ориентации магнитной стрелки (магнитного диполя) вдоль силовых линий поля. Современная наука связывает наличие у Земли магнитного поля с ее вращением. В центральной части земного шара находится железо-никелевое ядро, внутренняя часть которого твердая, а внешняя – жидкая. Температура ядра превышает 5000° , т.е. значительно выше точки Кюри. При такой температуре ядро не может обладать ферромагнитными свойствами, которые могли бы, в принципе,

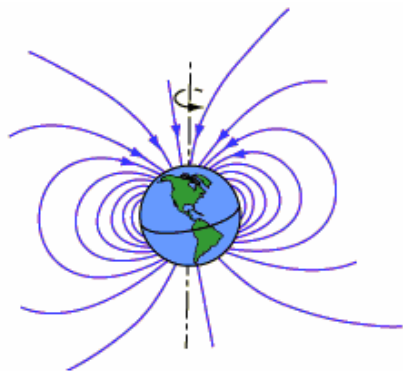


Рис. 1

объяснять наличие у Земли магнитного поля. Предполагается, что из-за вращения Земли вокруг собственной оси в жидком ядре возникают циркуляционные потоки. За счет трения различных слоев происходит разделение зарядов, приводящее к возникновению круговых токов. Круговой ток, как известно (см. [1]), создает в окружающем пространстве магнитное поле, характеризуемое магнитным моментом. Одним из аргументов в пользу такого объяснения природы земного магнетизма является отсутствие магнитного поля у Венеры, которая во многом похожа на Землю, но вращается в сотни раз медленнее Земли.

Как видно из рис. 1 силовые линии поля не параллельны поверхности планеты. Угол между вектором напряженности магнитного поля Земли и горизонтальной плоскостью в рассматриваемой точке земной поверхности называется магнитным наклоением. Вблизи полюсов магнитное наклонение составляет $\pm 90^\circ$, причем знак плюс соответствует северному полюсу (силовая линия направлена вниз), а минус – южному. На магнитном экваторе магнитное наклонение равно 0° . Величина индукции магнитного поля Земли находится в пределах 30-60 мкТл. У

полюсов она больше, в районе экватора – меньше. Индукция зависит, также, от геологического строения земной коры в точке измерения.

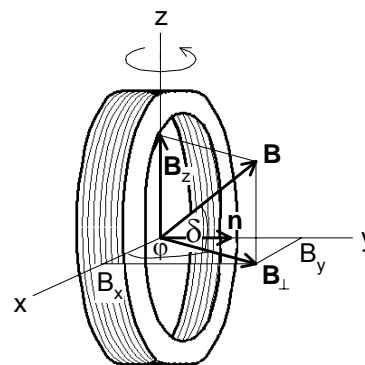


Рис. 2

В работе характеристики магнитного поля Земли определяются по э. д. с., индуцируемой в катушке с проводом при ее поочередном вращении вокруг трех перпендикулярных осей. Направим ось z вертикально вверх. Пусть катушка расположена так, что ее диаметр совпадает с осью z , а нормаль \mathbf{n} к плоскости витков направлена вдоль оси y (рис.2). Разложим вектор индукции \mathbf{B} на две составляющие, одна из которых (\mathbf{B}_z) направлена вдоль оси z , а другая (\mathbf{B}_\perp) перпендикулярна ей. Угол, который компонента \mathbf{B}_\perp составляет с осью x , обозначим φ . Поток Φ вектора \mathbf{B} через один виток катушки равен

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot dS = \int_S \vec{B}_z \cdot \vec{n} \cdot dS + \int_S \vec{B}_\perp \cdot \vec{n} \cdot dS = \int_S B_\perp \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} - \varphi \right] \cdot dS, \quad (1)$$

где интегрирование производится по площади витка S . В пределах площади витка величина B_\perp , очевидно, постоянна, и потому поток равен

$$\Phi = B_\perp \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} - \varphi \right] \cdot S. \quad (2)$$

При вращении катушки с угловой скоростью ω угол между нормалью и вектором \mathbf{B}_\perp увеличится за время t на величину ωt . Тогда зависимость потока от времени будет иметь вид

$$\Phi(t) = B_\perp \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} - \varphi + \omega t \right] \cdot S = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \cos \left[\frac{\pi}{2} - \varphi + \omega t \right] \cdot S. \quad (3)$$

Для катушки, имеющей N витков полный поток Ψ будет

$$\Psi = N \cdot \Phi. \quad (4)$$

Согласно закону Фарадея э. д. с. индукции ϵ_i равна

$$\epsilon_i = - \frac{d\Psi}{dt} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \cdot \omega \cdot N \cdot S \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} - \varphi + \omega t \right]. \quad (5)$$

Амплитудное значение э. д. с. тогда равно

$$\hat{\varepsilon}_i = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \cdot \omega \cdot N \cdot S = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot N \cdot \pi \cdot R^2, \quad (6)$$

где T – время, за которое катушка совершает один оборот, а R – радиус катушки. Очевидно, что аналогичные выражения получатся при вращении катушки и вокруг осей x и y . Обозначая амплитуды э. д. с. для случая вращения вокруг каждой из осей соответствующим индексом, запишем

$$\hat{\varepsilon}_x = A \cdot \sqrt{B_y^2 + B_z^2}, \quad (7)$$

$$\hat{\varepsilon}_y = A \cdot \sqrt{B_x^2 + B_z^2}, \quad (8)$$

$$\hat{\varepsilon}_z = A \cdot \sqrt{B_x^2 + B_y^2}, \quad (9)$$

где

$$A = \frac{2\pi^2 \cdot N \cdot R^2}{T}. \quad (10)$$

Из (7) – (9) найдем

$$B_x = \sqrt{\frac{-\hat{\varepsilon}_x^2 + \hat{\varepsilon}_y^2 + \hat{\varepsilon}_z^2}{2 \cdot A^2}}, \quad (11)$$

$$B_y = \sqrt{\frac{\hat{\varepsilon}_x^2 - \hat{\varepsilon}_y^2 + \hat{\varepsilon}_z^2}{2 \cdot A^2}}, \quad (12)$$

$$B_z = \sqrt{\frac{\hat{\varepsilon}_x^2 + \hat{\varepsilon}_y^2 - \hat{\varepsilon}_z^2}{2 \cdot A^2}}. \quad (13)$$

Полное значение магнитной индукции определится, как

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} = \sqrt{\frac{\hat{\varepsilon}_x^2 + \hat{\varepsilon}_y^2 + \hat{\varepsilon}_z^2}{2 \cdot A^2}}. \quad (14)$$

Для магнитного наклона δ (см. рис. 2) получим

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{B_z}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} = \sqrt{\frac{\hat{\varepsilon}_x^2 + \hat{\varepsilon}_y^2 - \hat{\varepsilon}_z^2}{2 \cdot \hat{\varepsilon}_z^2}}. \quad (15)$$

Направление север-юг в точке наблюдения можно найти, отсчитывая угол φ от выбранного при проведении опытов направления оси x (см рис. 2). Угол φ выражается через проекции B_x и B_y :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B_y}{B_x} = \sqrt{\frac{\hat{\varepsilon}_x^2 - \hat{\varepsilon}_y^2 + \hat{\varepsilon}_z^2}{-\hat{\varepsilon}_x^2 + \hat{\varepsilon}_y^2 + \hat{\varepsilon}_z^2}}. \quad (16)$$

Приборы и оборудование

Общий вид установки для проведения опытов показан на рис. 3. Катушка средним радиусом $R = 13.4$ см с $N = 320$ витков провода зажимается в патроне электродвигателя специальным ключом. Электродвигатель закрепляется на краю стола при помощи струбцины. Ось катушки может быть установлена вертикально и вдоль одной из

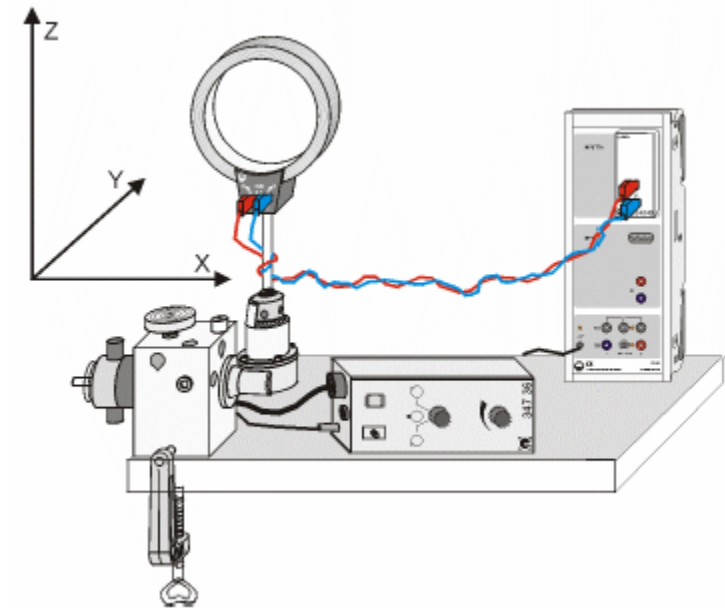


Рис. 3

горизонтальных осей поворотом головки редуктора. Для разворота оси катушки вдоль другой горизонтальной оси двигатель следует закрепить с другой стороны угла стола. Выходные клеммы катушки соединяются длинными проводами с блоком преобразователя, обеспечивающего ввод информации в персональный компьютер. Информация вводится в виде зависимости э. д. с., индуцируемой в катушке, от времени (рис. 4). В левой части экрана дана таблица из двух колонок (слева – время, справа – э. д. с.). Большая часть экрана занята соответствующим графиком.

Скорость вращения катушки устанавливается на блоке управления двигателем и не должна превышать долей оборота в секунду. В процессе вращения провода наматываются на ось катушки. Необходимо предусмотреть требуемую для этого длину свободных проводов и контролировать процесс намотки, направляя провода руками. **В случае натяжения проводов следует немедленно остановить двигатель.** После проведения каждого измерения провода разматываются переключением направления вращения катушки на блоке управления двигателем.

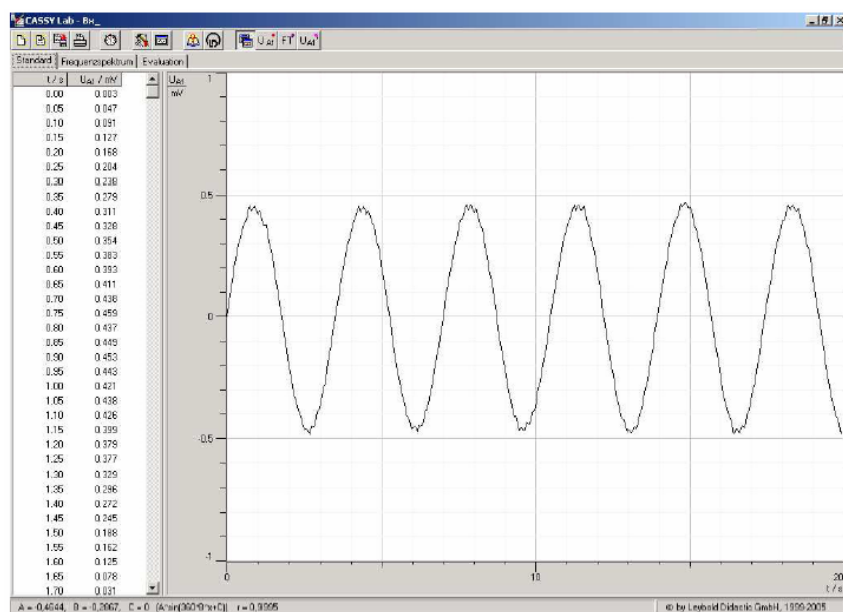





Рис. 4

Выполнение работы

- 1) Включить компьютер и загрузить программу измерений.
- 2) Присоединить провода от катушки к входу блока преобразователя, а выход преобразователя – к компьютеру.
- 3) Загрузить файл примера с жесткого диска, нажав мышью кнопку .
- 4) Очистить окно с данными, нажав мышью кнопку .
- 5) Расположить ось двигателя вертикально вверх.
- 6) Установить скорость двигателя на ноль и включить двигатель.
- 7) Плавно увеличить скорость вращения двигателя до примерно 0.3 оборотов в секунду.
- 8) Нажать мышью кнопку . При этом должна начаться запись информации на экране компьютера.
- 9) Контролировать намотку проводов на ось катушки, направляя их руками в течение измерения, которое продолжается 20 секунд.
- 10) Остановить двигатель. Переключить направления вращения, включить двигатель и размотать провода.
- 11) Определить время одного оборота катушки (периода синусоиды). Для этого щелкнуть правой клавишей мыши и на открывшейся вкладке выбрать “Set Marker/Measure Difference”.
- 12) Щелкнуть левой клавишей мыши на двух точках графика, разделенных периодом.
- 13) Нажать комбинацию клавиш Alt+T и прочитать с экрана время в секундах. Записать результат в журнал.
- 14) Определить амплитуду индуцированной э. д. с. Для этого щелкнуть правой клавишей мыши и на открывшейся вкладке выбрать “Set Marker/Measure Difference”.
- 15) Щелкнуть левой клавишей мыши в двух точках графика – там, где график пересекает ноль и в точке максимума.
- 16) Нажать комбинацию клавиш Alt+T и прочитать с экрана величину э. д. с. в мВ. Записать результат в журнал.
- 17) Повторить п.п. 6-16 еще два раза.

- 18) Перевести ось двигателя в горизонтальное положение и провести три раза измерения по методике описанной выше.
- 19) Перезакрепить двигатель так, чтобы ось катушки заняла перпендикулярное предыдущему случаю положение и провести три раза измерения, как описано выше.
- 20) Найти средние значения измеренных величин и их погрешности и рассчитать величину магнитного поля Земли и его наклонение по формулам (14) и (15), соответственно.
- 21) Найти угол между осью x и направлением север-юг по формуле (16).

Литература

1. И.В.Савельев. Курс общей физики, т.2. Наука, М. 1988.

Контрольные вопросы

1. Чему равен магнитный момент кольцевого тока?
2. Что такое температура Кюри?
3. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
4. Изменится ли результат измерений, если вращать катушку в противоположную сторону?