

РАБОТА 16

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы: изучение явления электромагнитной индукции; измерение индукции магнитного поля Земли.

Приборы и принадлежности: измерительная установка с вращающейся катушкой и интегрирующим усилителем.

Общие сведения. Факт существования магнитного поля Земли известен давно, однако развитой количественной теории этого поля в настоящее время не существует: предполагается, что главным источником поля являются вихревые токи в жидком ядре Земли. В первом приближении геомагнитное поле соответствует полю намагниченного шара, Северный полюс которого находится в Южном полушарии Земли, а Южный полюс – в Северном. Линии индукции магнитного поля Земли представляют собой замкнутые кривые, которые выходят из центра Земли через Южное полушарие, огибают поверхность Земли и через Северное полушарие возвращаются к центру. Наибольшее значение индукции магнитного поля Земли составляет около 70 мкТл (в районе Курской магнитной аномалии достигает 200 мкТл).

Исследуемые закономерности. В данной работе определение индукции магнитного поля основывается на использовании явления электромагнитной индукции.

При повороте контура, состоящего из N витков, в однородном магнитном поле с индукцией B в нем наводится электродвижущая сила (ЭДС) электромагнитной индукции

$$E_i = -d\Psi/dt,$$

где $\Psi = N\Phi$ — полный магнитный поток (потокосцепление), сцепленный с контуром; $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = BS \cos \alpha$ — поток вектора \mathbf{B} через плоскую поверхность площадью S , охватываемую контуром; $\mathbf{S} = S\mathbf{n}$ — вектор, равный S по модулю и направленный по нормали к этой поверхности; \mathbf{n} — единичный вектор (орт) нормали; α — угол между векторами \mathbf{B} и \mathbf{n} .

Возникающая ЭДС индукции вызывает в контуре сопротивлением R индукционный ток

$$i = \varepsilon_i/R = -(1/R) d\Psi/dt = -(N/R) d\Phi/dt. \quad (1)$$

(Ток определяется указанной формулой, если время переходного процесса в контуре индуктивностью L много меньше времени его поворота в магнитном поле. В работе это условие выполняется.) При этом через поперечное сечение проводников контура за время его поворота t переносится заряд

$$Q = \int_0^t i dt.$$

Если в цепь контура включить конденсатор емкостью C , то за время t напряжение на его обкладках изменится на величину

$$U = Q/C = C^{-1} \int_0^t i dt$$

или, с учетом выражения (1),

$$U = C^{-1} \int_0^t (-(N/R)(d\Phi/dt)dt) = -N/(CR) \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi = -[N/(CR)](\Phi_2 - \Phi_1),$$

здесь Φ_1 — поток вектора \mathbf{B} , пронизывающий контур в его начальном положении, а Φ_2 — в конечном.

При повороте контура на 180° нормаль также повернется на 180° , тогда

$$\Phi_2 = BS \cos(180^\circ + \alpha) = -BS \cos \alpha = \Phi_1 \text{ и}$$

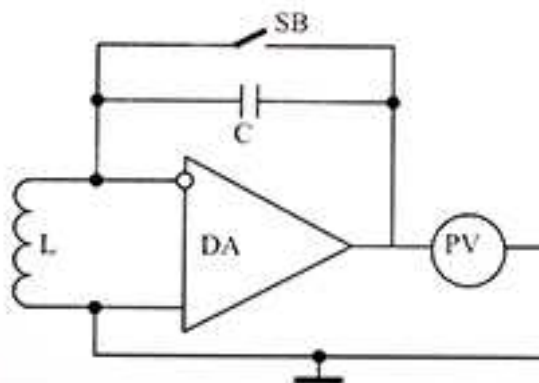
$$U = 2\Phi_1 N / (CR).$$

Выбрав начальное положение контура так, что $\alpha = 0$ (векторы \mathbf{B} и \mathbf{n} параллельны), получим $\Phi_2 = BS$ и

$$U = 2NBS / (RC).$$

Используя это соотношение, по заданным N , C , R , S и измеренной величине U можно рассчитать значение индукции B .

Методика измерений. Вектор индукции магнитного поля Земли \mathbf{B}_0 можно разложить на две составляющие: вертикальную $\mathbf{B}_в$ и горизонтальную $\mathbf{B}_г$. Поворачивая контур в магнитном поле Земли вокруг горизонтальной и вертикальной осей, определяют значения вертикальной $B_в$ и горизонтальной $B_г$ составляющих индукции магнитного поля Земли, а затем рассчитывают индукцию $B_0^2 = B_в^2 + B_г^2$.



Электрическая схема установки для измерения магнитного поля Земли представлена на рис. Измерительная катушка L подключена к входу операционного усилителя (ОУ) DA , цепь обратной связи которого образована конденсатором емкостью C . Напряжение на выходе ОУ, равное напряжению на конденсаторе C , измеряется вольтметром PV . Катушка закреплена на специальном каркасе, допускающем ее повороты на 180° вокруг горизонтальной и вертикальной осей и обеспечивающем выполнение условий $\mathbf{n} \parallel \mathbf{B}_в$ и $\mathbf{n} \parallel \mathbf{B}_г$ в крайних ее положениях.

Для определения значения $B_в$ измеряют напряжение $U_в = |U_{вк} - U_{вн}|$, возникающее на конденсаторе C при повороте катушки на 180° вокруг горизонтальной оси. Начальное напряжение $U_{вн}$ должно быть близким к нулю, что достигается разрядом конденсатора C при замыкании кнопки SB перед поворотом катушки. Конечное напряжение $U_{вк}$ измеряется в момент остановки катушки после ее поворота. Поворот должен осуществляться достаточно быстро: в течение 1...2 с.

Подобным образом для определения $B_г$ измеряют напряжение $U_г = |U_{гк} - U_{гн}|$, возникающее при повороте рамки с катушкой вокруг вертикальной оси на 180° , при этом плоскость катушки должна оставаться все время в вертикальном положении, а в начальном положении катушки ее нормаль должна быть направлена к северному или южному магнитному полюсу.

Указания по выполнению наблюдений и обработке результатов

1. Собрать и включить измерительную схему. Установить катушку в вертикальной плоскости в одном из крайних положений. Расположить установку так, чтобы магнитная стрелка компаса, установленного на корпусе, была перпендикулярна плоскости катушки.

2. Измерить не менее 10 раз напряжение $U_г$ при поворотах рамки с катушкой вокруг вертикальной оси на 180° .

3. Измерить не менее 10 раз напряжение $U_в$ при поворотах катушки вокруг горизонтальной оси на 180° .

4. Вычислить средние значения и доверительные погрешности напряжений U_b и U_r и значений B_b , B_r , B_0 . Параметры R , S , N и C указаны на панели установки.

5. Рассчитать значения и построить графики ЭДС индукции $E_{i1}(t)$ и $E_{i2}(t)$, возникающей в катушке при ее равномерном повороте на 180° за время поворота t_1 и t_2 вокруг горизонтальной оси (или, по указанию преподавателя, при повороте рамки с катушкой вокруг вертикальной оси), используя полученные в работе результаты и указанные на панели установки значения t_1 и t_2 .

Контрольные вопросы и задания

1. Изобразите (качественно) магнитное поле Земли.
2. Возникает ли индукционный ток в рамке, поступательно движущейся в однородном магнитном поле?
3. Как влияет на результат измерения горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля Земли «неточная» ориентация катушки на магнитные полюса?
4. Покажите, что закон Фарадея является следствием закона сохранения энергии.

Литература

Савельев И. В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. – Т 2, §§ 61, 62.

Лабораторный практикум по физике: Учеб. пособие для студентов вузов/Б. Ф. Алексеев, К. А. Барсуков, И. А. Войцеховская и др.; Под ред. К. А. Барсукова и Ю. И. Уханова. – М.: Высш. шк., 1988. – С 118-123.