

## 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;  $\alpha$  — 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  $\Phi_1$  — поток вектора  $\mathbf{B}$ , пронизывающий контур в его начальном положении, а  $\Phi_2$  — в конечном.

При повороте контура на  $180^\circ$  нормаль также повернется на  $180^\circ$ , тогда

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

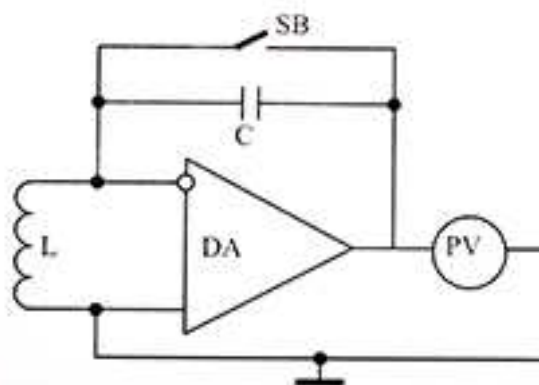
$$U = 2\Phi_1 N / (CR).$$

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  $180^\circ$  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  $180^\circ$  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  $180^\circ$ , 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  $180^\circ$ .

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

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  $180^\circ$  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.