

## Р3461. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ МЕТОДОМ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ИНДУКЦИОННОЙ КАТУШКИ

### Цель работы:

Знакомство с элементами земного магнетизма.

### Решаемые задачи:

- Измерение составляющих индукции магнитного поля Земли.
- Определение углов склонения и наклонения магнитного поля Земли.

### Краткая теория.

Характеристиками магнитного поля Земли служат вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}_0$  и его составляющие  $\mathbf{B}_X$ ,  $\mathbf{B}_Y$  и  $\mathbf{B}_Z$  (рис. 1). Для разложения вектора  $\mathbf{B}_0$  на составляющие обычно принимают прямоугольную систему координат, в которой ось  $X$  ориентируют на север по направлению географического меридиана, ось  $Y$  – на восток по параллели и ось  $Z$  – вертикально вниз (к центру Земли). На рис. 1 изображен вектор  $\mathbf{B}_0$  и его проекции на координатные оси и плоскость  $XOY$ . Проекция  $\mathbf{B}_X$  этого вектора на ось  $X$  называется северной составляющей, проекция  $\mathbf{B}_Y$  на ось  $Y$  – восточной составляющей, и проекция  $\mathbf{B}_Z$  на ось  $Z$  – вертикальной составляющей. Проекция  $\mathbf{B}_{XY}$  вектора  $\mathbf{B}_0$  на плоскость  $XOY$  называется горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли. Значения проекций  $B_{XY}$ ,  $B_X$  и  $B_Y$  связаны между собой выражением:

$$B_{XY} = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2}. \quad (1)$$

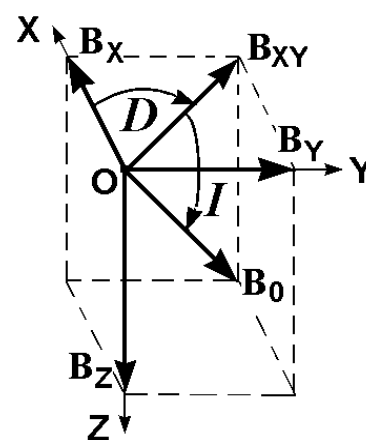


Рис. 1

Вертикальная плоскость  $ZOB_{XY}$ , в которой находится вектор  $\mathbf{B}_0$ , называется плоскостью магнитного меридиана, а угол  $D$  между этой плоскостью и плоскостью  $XOZ$  – магнитным склонением. Наконец, угол  $I$  между горизонтальной плоскостью и направлением вектора  $\mathbf{B}_0$  называется магнитным наклонением. Склонение  $D$ , наклонение  $I$ , горизонтальная  $\mathbf{B}_{XY}$ , северная  $\mathbf{B}_X$ , восточная  $\mathbf{B}_Y$  и вертикальная  $\mathbf{B}_Z$  составляющие называются элементами земного магнетизма.

### Обоснование методики измерений

Магнитный поток, пронизывающий круговую катушку индуктивности при ее вращении с постоянной угловой частотой  $\omega$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$  около оси, проходящей по его диаметру  $d$ , зависит от времени по закону:

$$\Phi = \pi \cdot R^2 \cdot N \cdot B \cdot \cos(\omega t), \quad (2)$$

где  $R$  – радиус и  $N$  – число витков катушки индуктивности. В формуле (2) предполагается, что ось вращения катушки перпендикулярна направлению индукции магнитного поля. ЭДС электромагнитной индукции равна:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = \pi R^2 N B \omega \sin(\omega t). \quad (3)$$

Амплитудное значение ЭДС запишется как:

$$\mathcal{E}_0 = \pi R^2 N B \omega = \eta B, \quad (4)$$

где 
$$\eta = \pi N \omega R^2. \quad (5)$$

Или с учетом формулы связи периода  $T$  с угловой частотой  $\omega$  вращения катушки ( $\omega = 2\pi/T$ ) имеем:

$$\eta = \frac{2\pi^2 N R^2}{T}. \quad (6)$$

При вращении катушки вокруг направления оси  $OZ$  амплитудное значение эдс равно:

$$\mathcal{E}_{0Z} = \eta \sqrt{B_X^2 + B_Y^2}. \quad (7)$$

Соответственно, при вращении катушки вокруг осей  $OX$  и  $OY$  имеем:

$$\mathcal{E}_{0X} = \eta \sqrt{B_Y^2 + B_Z^2} \quad (8)$$

и

$$\mathcal{E}_{0Y} = \eta \sqrt{B_X^2 + B_Z^2}. \quad (9)$$

Решение системы уравнений (7) – (9) дает нам возможность получить расчетные формулы для составляющих индукции магнитного поля Земли:

$$B_X = \sqrt{\frac{-\mathcal{E}_{0X}^2 + \mathcal{E}_{0Y}^2 + \mathcal{E}_{0Z}^2}{2\eta^2}}, \quad (10)$$

$$B_Y = \sqrt{\frac{\mathcal{E}_{0X}^2 - \mathcal{E}_{0Y}^2 + \mathcal{E}_{0Z}^2}{2\eta^2}}, \quad (11)$$

$$B_Z = \sqrt{\frac{\mathcal{E}_{0X}^2 + \mathcal{E}_{0Y}^2 - \mathcal{E}_{0Z}^2}{2\eta^2}}. \quad (12)$$

И, наконец, для модуля индукции магнитного поля Земли получим:

$$B_0 = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{0X}^2 + \varepsilon_{0Y}^2 + \varepsilon_{0Z}^2}{2\eta^2}}. \quad (13)$$

Магнитное наклонение  $I$  и склонение  $D$  могут быть рассчитаны по формулам:

$$\operatorname{tg} I = \frac{B_Z}{\sqrt{B_X^2 + B_Y^2}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{0X}^2 + \varepsilon_{0Y}^2 - \varepsilon_{0Z}^2}{2\varepsilon_{0Z}^2}} \quad (14)$$

и

$$\operatorname{tg} D = \frac{B_Y}{B_X} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{0X}^2 - \varepsilon_{0Y}^2 + \varepsilon_{0Z}^2}{-\varepsilon_{0X}^2 + \varepsilon_{0Y}^2 + \varepsilon_{0Z}^2}}. \quad (15)$$

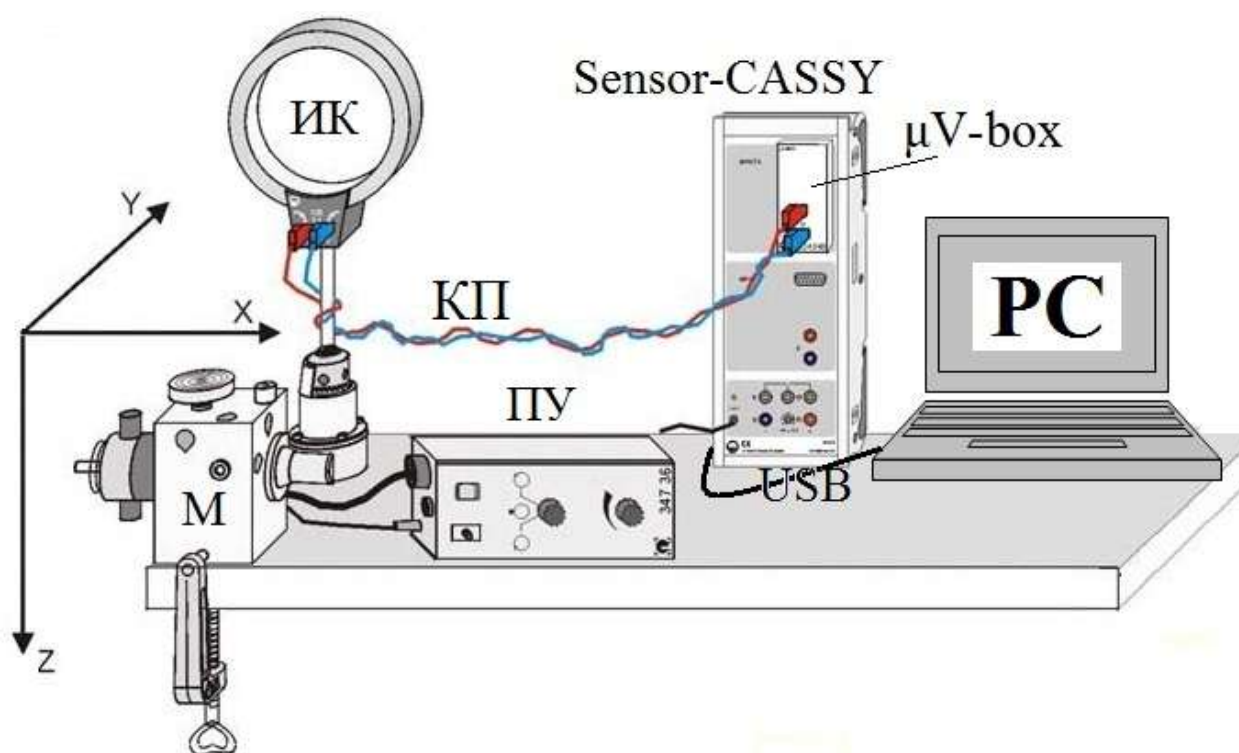


Рис. 2. Внешний вид измерительной установки.

Оборудование:

- 1) Индукционная катушка ИК,
- 2) Электромотор М,
- 3) Пульт управления электромотором ПУ,
- 4) Контактные провода КП,
- 5) Измерительный прибор «Sensor-CASSY»,
- 6) Адаптер эдс «μV-box»,
- 7) Компьютер PC с ОС «Windows» и программой «CASSY Lab 2».

### Меры безопасности!

В работе контактные провода КП будут наматываться на держатель катушки. Во избежание обрыва проводов не позволяйте электромотору вращаться быстро! Электромотор должен быть остановлен немедленно после того, как на дисплее компьютера появится полная синусоида! Рекомендуется работу выполнять вдвоем. Один студент осуществляет действия с пультом управления ПУ, а другой студент держит в руках контактные провода КП и следит за их правильной намоткой на держатель измерительной катушки ИК.

### Настройка измерительной установки для измерения ЭДС-индукции $\mathcal{E}_Z$ .

1. Укрепить ось вращения катушки ИК в вертикальном положении.
2. Включить пакетный выключатель, расположенный сбоку на стенде.
3. Освоить технику работы с пультом управления ПУ:  
осторожно поворачивая ручки пульта в разные стороны добиться уверенности в управлении а) коммутацией направления вращения индукционной катушки – ручка «П-Стоп-Л» и б) скоростью ее вращения – ручка «СКОРОСТЬ». Положения ручки «П-Стоп-Л» означают: «П» – вращение вправо, «Стоп» – остановка мотора и «Л» – вращение влево.
4. Установить ручки пульта управления в режим ожидания, то есть ручку «П-Стоп-Л» – в положение «Стоп», – ручку «СКОРОСТЬ» – в крайнее левое положение.
5. Получить разрешение на выполнение практической части работы.



Рис. 3.

### Измерение ЭДС-индукции $\mathcal{E}_Z$

1. Включить компьютер РС.
2. Запустить программу “Cassy Lab 2” при помощи ярлыка, расположенного на “Рабочем столе” РС.
3. Открыть файл “D:\Эксперименты\Р3461.labx”.
4. Закрывать иконкой “Close” окно “CASSYS”.
5. Ручкой ПУ «П-Стоп-Л» привести во вращение индукционную катушку с частотой не более 1 оборота в секунду.
6. После того, как катушка повернулась на 2 оборота начать измерения нажатием клавиши “F9” на клавиатуре РС. Процесс измерения заканчивается автоматически или прерывается принудительно экспериментатором при повторном нажатии на клавишу “F9”.
7. После окончания измерения незамедлительно остановить вращение катушки ИК переключив ручку ПУ «П-Стоп-Л» в положение «Стоп».

8. При повторных измерениях необходимо чередовать направление вращения катушки. Направление вращения не влияет на результат, но позволяет ослабить натяжение соединительных проводов, возникающее в результате их чрезмерной намотки на ось вращения.
9. Оценить качество синусоиды. Если она окажется искаженной, повторить измерение при той же или другой скорости вращения, изменив одновременно направление вращения катушки на противоположное. Если ВЛ полагаете, что качество синусоиды удовлетворительное, то можно остановить процесс измерения ЭДС  $\mathcal{E}_Z$ .
10. Сохранить результаты измерения  $\mathcal{E}_Z$  на внешнем носителе информации. Ручку «ЧАСТОТА» на пульте ПУ оставить в прежнем положении (частота вращения катушки не должна меняться до полного завершения измерений) и перейти к измерениям ЭДС  $\mathcal{E}_X$ .

#### Измерение ЭДС-индукции $\mathcal{E}_X$ .

1. Укрепить ось вращения катушки ИК в горизонтальном положении в направлении ОХ на север (или на юг).
2. Подготовить установку для новых измерений. Для этого активировать на дисплее РС последовательно строки меню "Measurement" (Измерение) – "Append new Measurement Series" (Показать новый ряд измерений).
3. Ручкой ПУ «П-Стоп-Л» привести во вращение индукционную катушку на той же частоте, что и в предыдущем измерении  $\mathcal{E}_Z$ .
4. После того, как катушка совершит 2 оборота, начать измерения нажатием клавиши "F9" на клавиатуре РС. Процесс измерения заканчивается также автоматически или прерывается принудительно экспериментатором при повторном нажатии на клавишу "F9".
5. После окончания измерения незамедлительно остановить вращение катушки ИК переключив ручку ПУ «П-Стоп-Л» в положение «Стоп».
6. При повторных измерениях необходимо чередовать направление вращения катушки.
7. Оценить качество синусоиды. Если она – искаженная, повторить измерение при той же скорости вращения, изменив направление вращения катушки на противоположное. Если ВЛ считаете, что качество синусоиды удовлетворительное, то можно остановить измерения ЭДС  $\mathcal{E}_X$ .
8. Сохранить результаты измерения  $\mathcal{E}_X$  на внешнем диске.

#### Измерения ЭДС-индукции $\mathcal{E}_Y$

1. Укрепить ось вращения катушки ИК в горизонтальном положении в направлении ОУ на восток (или на запад).

2. Подготовить установку для новых измерений. Для этого активировать на дисплее РС последовательно строки меню "Measurement" (Измерение) – "Append new Measurement Series" (Показать новый ряд измерений).
3. Выполнить измерения  $\mathcal{E}_Y$  согласно пунктам 3-8 измерений  $\mathcal{E}_X$ .

### Обработка экспериментальных данных

Существует несколько вариантов обработки экспериментальных данных. Для определения численных значений составляющих индукции магнитного поля Земли  $B_X$ ,  $B_Y$  и  $B_Z$  согласно формулам (5), (6), (10) - (12) необходимы сведения о численных значениях амплитуд ЭДС-индукции  $\mathcal{E}_{0X}$ ,  $\mathcal{E}_{0Y}$ ,  $\mathcal{E}_{0Z}$  и угловой частоты  $\omega$  или периода  $T$  вращения индукционной катушки.

#### 1 способ (полуавтоматический)

В таблице результатов измерений, расположенной в колонках меню "Standard", автоматически фиксируются текущие значения ЭДС-индукции  $\mathcal{E}_{Xi}$ ,  $\mathcal{E}_{Yi}$ ,  $\mathcal{E}_{Zi}$  и моменты времени их измерения  $t_i$ . Среди всего набора данных следует выписать амплитудные значения ЭДС-индукции  $\mathcal{E}_{0Xj}$ ,  $\mathcal{E}_{0Yj}$ ,  $\mathcal{E}_{0Zj}$  и соответствующие этим значениям моменты времени измерения  $t_{0Xj}$ ,  $t_{0Yj}$ ,  $t_{0Zj}$ . По значениям времен  $t_{0Xj}$ ,  $t_{0Yj}$ ,  $t_{0Zj}$  вычислить периоды колебаний ЭДС  $T_{Xj}$ ,  $T_{Yj}$ ,  $T_{Zj}$  и их среднее  $T_{cp}$ . По формуле (6) выполнить расчет коэффициента  $\eta$  для значений  $N = 320$ ,  $d = 0,135$  м и  $T = T_{cp}$ . На завершающем этапе вычислений следует воспользоваться формулами (10) – (12), (1), (13) – (15) и рассчитать все элементы земного магнетизма:  $B_X$ ,  $B_Y$ ,  $B_Z$ ,  $B_{XY}$ ,  $B_0$ ,  $tgI$ ,  $I$ ,  $tgD$  и  $D$ .

#### 2 способ (программный)

Экспериментальные зависимости  $\mathcal{E}_X(t)$ ,  $\mathcal{E}_Y(t)$  и  $\mathcal{E}_Z(t)$  аппроксимируются программными средствами аналитической функцией  $f(x, A, B, C) = A \cdot \sin(360 \cdot B \cdot x + C)$ , причем значения подгоночных параметров компьютер высвечивает на экране дисплея. Экспериментатору остается заняться расчетами выходных параметров эксперимента. Порядок обработки экспериментальных данных по этому способу описывается ниже.

#### Расчет значений амплитуды ЭДС $\mathcal{E}_{0Z}$ и периода $T_Z$ из измерений $\mathcal{E}_{0Z}$ .

1. В меню программы "Measurement" (Измерение) активировать опцию "Select Measurement Series" (Выбрать измерительную серию) – "Measurement Series # 1" (Измерительная серия №1).

2. В меню программы "Diagram" (Диаграмма) активировать опцию "Fit Function" (Аппроксимирующая функция) – "Free Fit  $f(x,A,B,C,D)$ " (Свободная аппроксимация  $f(x,A,B,C,D)$ ).
3. В появившемся окне в верхней пустой строке с названием " $f(x,A,B,C,D)$ " выбрать встроенную функцию " $A*\sin(360*B*x+C)$ ".
4. В расположенных ниже окошечках ввести (напечатать) приближенные числовые значения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

Подсказка:  $A$  – это амплитуда, следовательно, печатаем любое табличное экспериментальное значение амплитуды, взятое в меню "Standard";  $B$  – это циклическая частота колебаний, следовательно, берем любое значение времени, близкое к периоду колебаний, находим обратную величину и вводим ее в окошко;  $C$  – начальная фаза в градусах, его значение определяется по графику в пределах  $0 \leq C \leq 360$ ).

5. Навести курсор на надпись "Continue with Range Marking" (Продолжить выбор области данных) и щелкнуть левой кнопкой мыши.
6. Навести курсор на начало графика синусоиды на экране дисплея, нажать левую кнопку мышки, и удерживая нажатой, перетащить курсор до конечной точки графика. Отпустить левую кнопку.
7. Войти в меню "Diagram" (Диаграмма) – активировать опцию "Set Marker" (Установить маркер) – "Text" (Текст).
8. В появившемся окне выбрать "Font Size" (Размер шрифта) – "small" (мелкий) – "medium" (средний) или "large" (крупный) и нажать "OK"
9. Выписать с экрана значения коэффициентов  $A = \mathcal{E}_{0z_j}$  и  $B = 1 / T$ .
10. Выполнить расчет коэффициента  $\eta$  по формуле (6) для значений  $N = 320$ ,  $d = 0,135$  м и  $T = 1 / B$ , где  $B$  – параметр аппроксимации (см. п. 9).

Расчет значений амплитуды ЭДС  $\mathcal{E}_{0x}$  и периода  $T_x$  из измерений  $\mathcal{E}_{0x}$ .

1. В меню программы "Measurement" (Измерение) активировать опцию "Select Measurement Series" (Выбрать измерительную серию) – "Measurement Series # 2" (Измерительная серия №2).
2. Повторить все только-что выполненные действия по расчету  $\mathcal{E}_{0z}$  и  $T_z$ , описанные в п.п. 2 – 10.

Расчет значений амплитуды ЭДС  $\mathcal{E}_{0y}$  и периода  $T_y$  из измерений  $\mathcal{E}_{0y}$ .

1. В меню программы "Measurement" (Измерение) активировать опцию "Select Measurement Series" (Выбрать измерительную серию) – "Measurement Series # 3" (Измерительная серия №3).

2. Повторить все только-что выполненные действия по расчету  $\mathcal{E}_{0Z}$  и  $T_Z$ , описанные в п.п. 2 – 10.
3. Повторить все действия, описанные в п.п. 2 – 10 по расчету  $\mathcal{E}_{0Z}$  и  $T_Z$ .

На завершающем этапе расчетов следует вычислить среднее значение периода  $T_{cp} = (T_X + T_Y + T_Z)/3$  по трем результатам  $T_X$ ,  $T_Y$  и  $T_Z$ , вычислить коэффициент  $\eta$  по формуле (6) приняв  $T = T_{cp}$ . Далее воспользоваться формулами (10) – (12), (1), (13) – (15) и рассчитать все элементы земного магнетизма:  $B_X$ ,  $B_Y$ ,  $B_Z$ ,  $B_{XY}$ ,  $B_0$ ,  $\text{tg}I$ ,  $I$ ,  $\text{tg}D$  и  $D$ .

Отключить установку.

### Контрольные вопросы:

1. Системы единиц измерения физических величин СГСЭ, СГСМ, Гаусса и СИ. Отношение единиц измерения силы тока в различных системах.
2. Индукция магнитного поля. Единицы измерения и соотношение между ними.
3. Закон Био-Савара-Лапласа. Индукция магнитного поля кругового тока.
4. Элементы Земного магнетизма.
5. Вывод рабочих формул.

### Литература:

1. Иродов И. Е. Электромагнетизм. Основные законы. – М.-СПб.: Физматлит, 2000.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 3. – М.: Физматлит-МФТИ, 2002.
3. Савельев И. В. Курс общей физики. Кн. 2. Электричество и магнетизм. – М.: Апрель – АСТ, 2003.
4. Чертов А. Г. Международная система единиц измерений. – М.: Высшая школа, 1977.
5. Епифанов Г. И. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1977.
6. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 1977.
7. Калашников С. Г. Электричество. – М.: Физматлит, 2003.
8. Лабораторные работы общего физического практикума. Электричество и магнетизм. – Казань: КГУ, 2006.