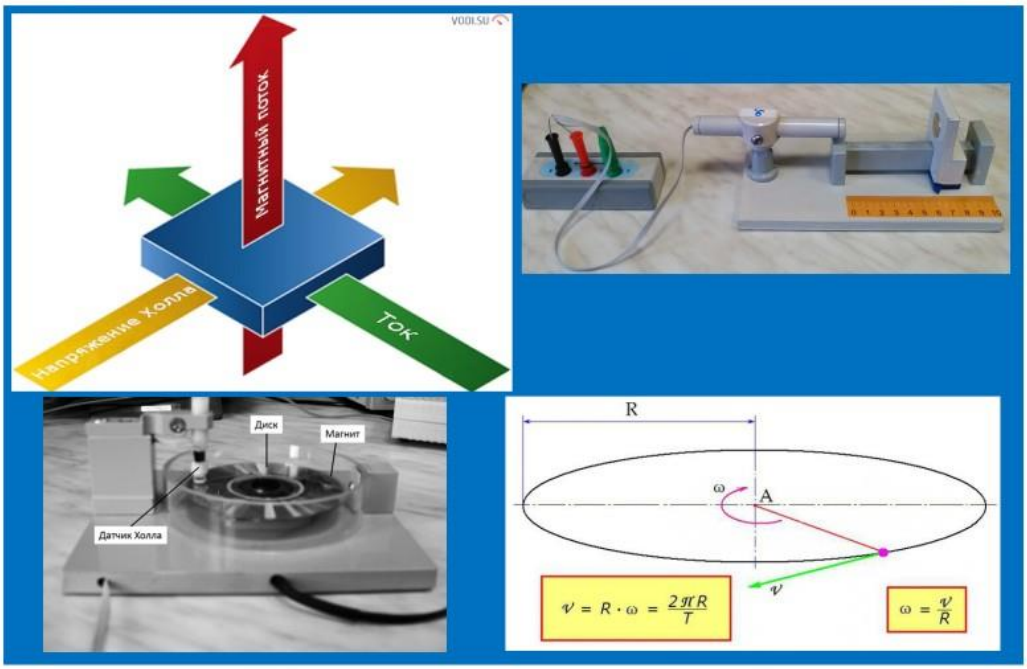
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МГУ им. М.В. ЛОМОНОСОВА

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторный практикум

Лабораторная работа № 6

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ



2017

Цель работы

Освоение методики измерения индукции магнитного поля при помощи датчика Холла и индукционного датчика. Определение угловой скорости вращения вала мотора при помощи датчика Холла.

Теоретическое введение

Для измерения индукции магнитного поля $\boldsymbol{B}$ используются два основных метода: метод измерения с помощью датчика Холл, *основанный на использовании эффекта Холла*, и метод измерения, *основанный на применении закона электромагнитной индукции*.

Эффект Холла заключается в возникновении разности потенциалов при протекании постоянного тока через проводящую пластину, помещенную в постоянное магнитное поле, перпендикулярное плоскости пластинки и направлению тока. В отсутствие внешнего магнитного поля в проводнике под действием постоянного электрического поля имеет место направленное движение зарядов q со скоростью υ (рис.1).

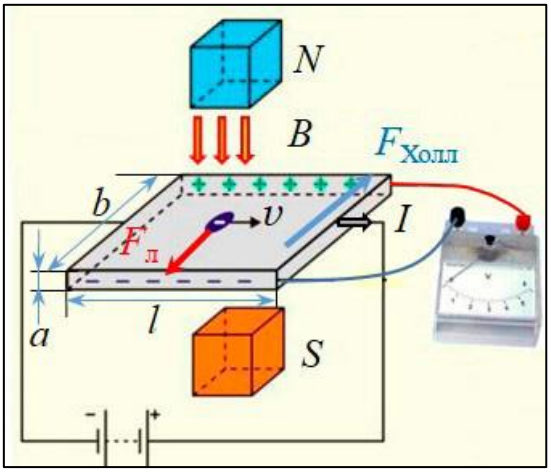


Рис. 1. Эффект Холла в проводнике прямоугольной формы.

При наложении магнитного поля $\boldsymbol{B}$, на заряды действует ***сила Лоренца*** под действием которой частицы отклоняются в направлении, перпендикулярном $\boldsymbol{\upsilon}$ и $\boldsymbol{B}$:

$$\boldsymbol{F}_л = q[\boldsymbol{\upsilon}, \boldsymbol{B}]. \qquad (1)$$

В результате при протекании постоянного тока по проводнику, помещенному в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока, в проводнике возникает электрическое поле, напряженность которого перпендикулярна как направлению тока в проводнике, так и вектору магнитной индукции – поле Холла $\boldsymbol{E}_{Холл}$.

В свою очередь поле Холла действует на заряды и уравновешивает силу Лоренца, т.е.

$$q\boldsymbol{E}_{Холл} = q[\boldsymbol{\upsilon}, \boldsymbol{B}]. \qquad (2)$$

Из (2) следует, что

$$\boldsymbol{E}_{Холл} = \boldsymbol{\upsilon B}. \qquad (3)$$

Обозначим поперечные размеры пластинки прямоугольной формы через a и b (см. рис.1).

Измеряя напряжение $U_{\text{Холл}}$ между боковыми гранями пластинки при фиксированном токе в проводнике, можно судить о величине индукции магнитного поля, котором находится проводник. Величина $U_{\text{Холл}}$ будет равна

$$U_{\text{Холл}} = Eb = \upsilon Bb. \qquad (4)$$

Если по проводнику течет ток I, а площадь поперечного сечения проводника $S = ab$, то величина плотности тока (в первом приближении можно считать ток равномерно распределенным по сечению проводника)

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I}{ab}. \qquad (5)$$

С другой стороны, если концентрация зарядов n, а сами заряды движутся равномерно со скоростью υ, то плотность объемного тока

$$j = qn\upsilon. \qquad (6)$$

Выражая из (6) и (5) скорость и подставляя ее в (4), получим

$$U_{\text{Холл}} = \frac{1}{qn} \cdot \frac{IB}{a} = R \cdot \frac{IB}{a}. \qquad (7)$$

Формула (7) описывает эффект Холла, в этой формуле коэффициент пропорциональности R, называемый постоянной Холла, является характеристикой материала, из которого изготовлен образец

$$R = \frac{1}{qn}. \qquad (8)$$

Из (7) видно, что ЭДС холла является линейной функцией индукции поля, т.е. верно равенство

$$U_{\text{Холл}} = kB, \qquad (9)$$

где константа

$$k = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I}{a}. \qquad (10)$$

Константа k, входящая в (9), содержит следующие параметры: заряд носителей q и концентрация носителей n, которые необходимо определить. Однако на практике константа k определяется с помощью градуировки прибора в магнитном поле с известной индукцией B.

Принцип действия индукционного датчика основан на законе электромагнитной индукции.

Когда поток вектора магнитной индукции через площадь замкнутого проводящего контура изменяется, в нем возникает ЭДС электромагнитной индукции в соответствии с законом Фарадея

$$\boldsymbol{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \qquad (11)$$

и течет индукционный ток в соответствии с законом Ома.

Пусть однородное магнитное поле с модулем индукции B создается длинным соленоидом K_1 (длина L) с числом витков N_1 (рис.1). Внутри соленоида находится короткая ($l << L$, l – длина катушка) катушка K_2 , содержащая N_2 витков одинаковой площади S. Магнитное поле соленоида пронизывает катушку нормально их плоскости, поэтому поток магнитной индукции можно записать как

$$\Phi = BSN_2. \qquad (12)$$

При помещении датчика в переменное магнитное поле в нем возникает ЭДС индукции, величина которой определяется зависимостью

$$\varepsilon = -n\frac{d\Phi}{dt} = -nS_0\cos\alpha\frac{dB}{dt}, \qquad (13)$$

где n – число витков измерительной катушки, S_0 – площадь поперечного сечения датчика, Φ – магнитный поток магнитного поля, проходимый через датчик, B – модуль вектора индукции магнитного поля, α - угол между нормалью к поперечному сечению измерительной катушки и вектором $\boldsymbol{B}$.

Так как соленоиды питаются переменным током, магнитное поле, которое они создают вокруг себя, меняется по закону

$$B = B_0\cos\omega t, \qquad (14)$$

где B_0 – амплитудное значение модуля вектора индукции магнитного поля, ω – угловая частота переменного тока, создающего магнитное поле.

Следовательно,

$$\varepsilon = B_0 \cdot S_0 n\omega\cos\alpha\sin\omega t. \qquad (15)$$

При измерении ЭДС катушки милливольтметром измеряется ее эффективное значение, равное

$$\varepsilon_{эфф} = \varepsilon_{амп} / \sqrt{2} = B_0 S_0 \cdot \omega \ n \cos\alpha / \sqrt{2}. \qquad (16)$$

Из формулы (16) видно, что эффективное значение ЭДС будет максимальным, когда плоскость измерительной катушки составит угол 90° к направлению силовой линии магнитного поля, т.е.

$$\varepsilon_{эфф_{\max}} = B_0 S_0 n\omega / \sqrt{2}. \qquad (17)$$

Это обстоятельство позволяет с помощью измерительной катушки определить положение силовых линий магнитного поля в любой области поля.

Если известна качественная зависимость между максимальной величиной эффективного значения ЭДС измерительной катушки $\varepsilon_{эфф_{\max}}$ и эффективным значением модуля вектора магнитной индукции $B_{эфф}$, изменение которого создает эту ЭДС, можно найти эффективное или амплитудное значение модуля вектора магнитной индукции в любой области исследуемого магнитного поля. Установление вышеприведенной количественной зависимости называется *тарированием измерительной катушки*.

При этом чувствительность индукционного датчика равна

$$K_{инд} = \frac{\Delta U_{эфф}}{\Delta B}, \qquad (18)$$

где $\Delta U_{эфф}$ – изменение величины эффективного значения ЭДС при изменении индукции магнитного поля ΔB.

Экспериментальная часть

Упражнение 1. Измерение индукции магнитного поля постоянного магнита

Общий вид установки для измерения индукции магнитного поля представлен на рис. 1. Установка состоит из основания (*1*), на котором находятся: неподвижная рейка (*2*), по которой может перемещаться ползунок (*3*) с

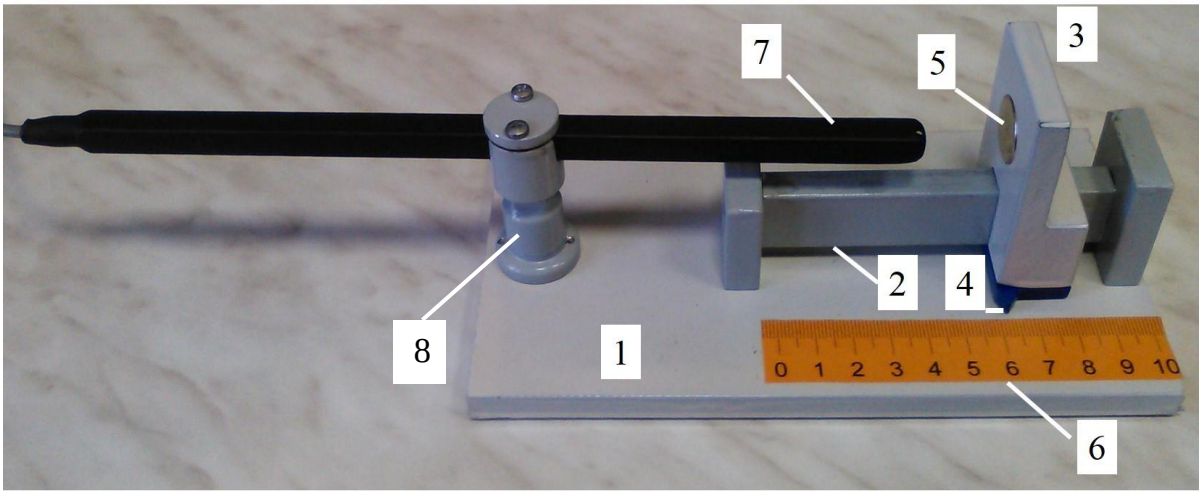


Рис. 1. Общий вид установки для измерения индукции магнитного поля.

указателем (*4*). На ползунке укреплен короткий постоянный магнит (*5*). Положение магнита определяется линейкой (*6*). Индукция магнитного поля измеряется USB-датчиком магнитного поля (*7*), закреплённом в держателе (*8*) и подключённом к компьютеру.

Измерения

1. Запустите на компьютере программу для работы с USB-датчиком магнитного поля “**Цифровая лаборатория**”

(рис. 2).

Рис. 2. Меню программы для работы с USB-датчиком магнитного поля.

2. Откалибруйте USB-датчик нажатием на кнопку "**Установить 0**" (убедитесь в том, что поблизости нет магнитных объектов).
3. Установите USB-датчик в держатель (*8*) на основании (*1*) (рис.1). (**ползунок с постоянным магнитом должен находится на достаточном расстоянии от USB-датчика)**.
4. Установите постоянный магнит таким образом (см. рис. 1), чтобы он был как можно ближе к нулевой отметке линейки.
5. Измерьте индукцию магнитного поля, последовательно увеличивая расстояние между постоянным магнитом и датчиком на **2 мм**. **В случае получения отрицательных значений индукции магнитного поля их необходимо брать по модулю.** Проведите **не менее 30 измерений**. Результаты запишите в табл. 1.

Таблица 1

d, мм	d^3, мм^3	B, мТл	A, $\frac{\text{кг}\cdot\text{м}^3}{\text{А}\cdot\text{с}^2}$	μ, А·м^2

Обработка результатов

1. Постройте зависимость B от расстояния d между датчиком и магнитом.
2. Вычислите d^3. Результаты запишите в табл. 1.
3. Постройте график зависимости B от $1/d^3$ и, выбрав на нём линейную часть, обработайте его по методу наименьших квадратов. Определите коэффициенты A в формуле $B = A\frac{1}{d^3}$. Определите по методу наименьших квадратов погрешности значений A. Результаты запишите в табл.1.
4. Коэффициент A равен

$$A = \frac{\mu_0 2\mu}{4\pi},$$

где μ_0 = 1,25663706·10^{-6} кг·м/ А^2·с^2 – магнитная постоянная.

С помощью этой формулы можно определить магнитный момент магнита

$$\mu = \frac{2A\pi}{\mu_0}.$$

Вычислите значение μ. Результат запишите в табл. 1.

5. Рассчитайте стандартное отклонение σ_μ по формуле для косвенных измерений, считая, что μ_0 и π определены без погрешностей ($\pi = 3{,}14$)

$$\sigma_\mu = \sqrt{\left(\frac{\partial \mu}{\partial A}\right)^2 \cdot \sigma_A^2}.$$

Результаты расчётов также запишите в табл. 1.

Упражнение 2. **Калибровка датчика Холла**

В данном упражнении используется установка, аналогичная представленной на рис. 1, в которой вместо измерителя индукции магнитного поля установлен датчик Холла, находящийся в трубке (см. рис. 3).

Датчик Холла соединен с блоком коммутации, электрическая схема которого

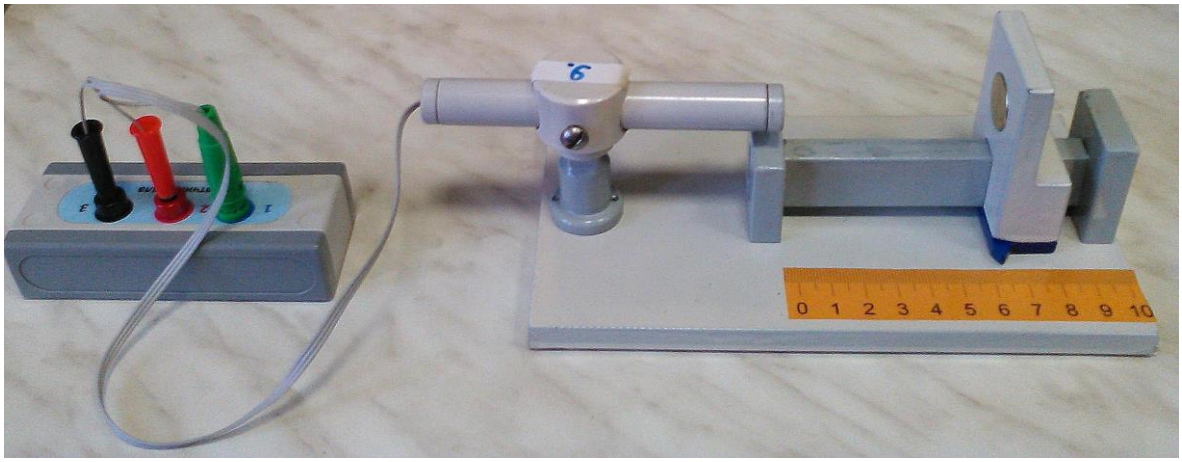


Рис. 3. Установка для градуировки датчика Холла.

представлена на рис. 4. На блок коммутации, осуществляющий стабилизированное питание датчика Холла, подаётся **напряжение 7 В** от внешнего блока питания. Через блок коммутации осуществляется подключение датчика к вольтметру (рис. 5).

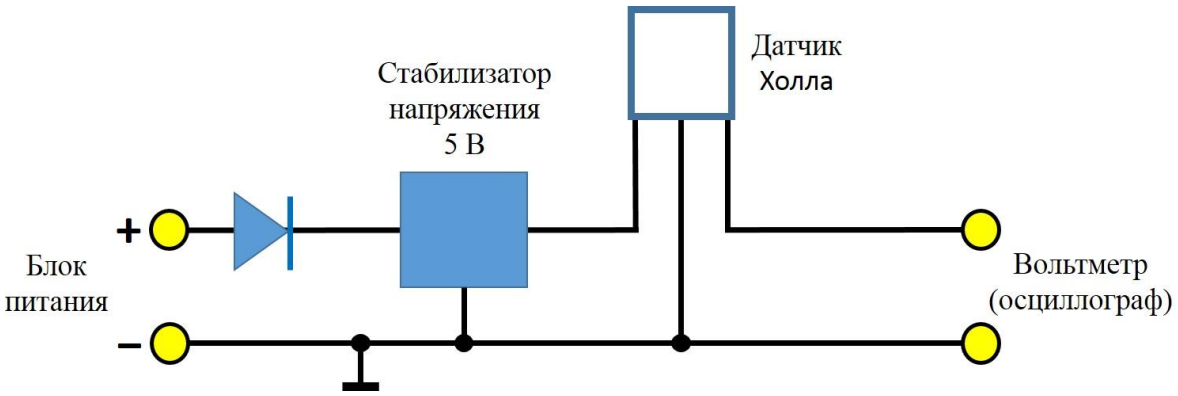


Рис. 4. Электрическая схема блока коммуникации.

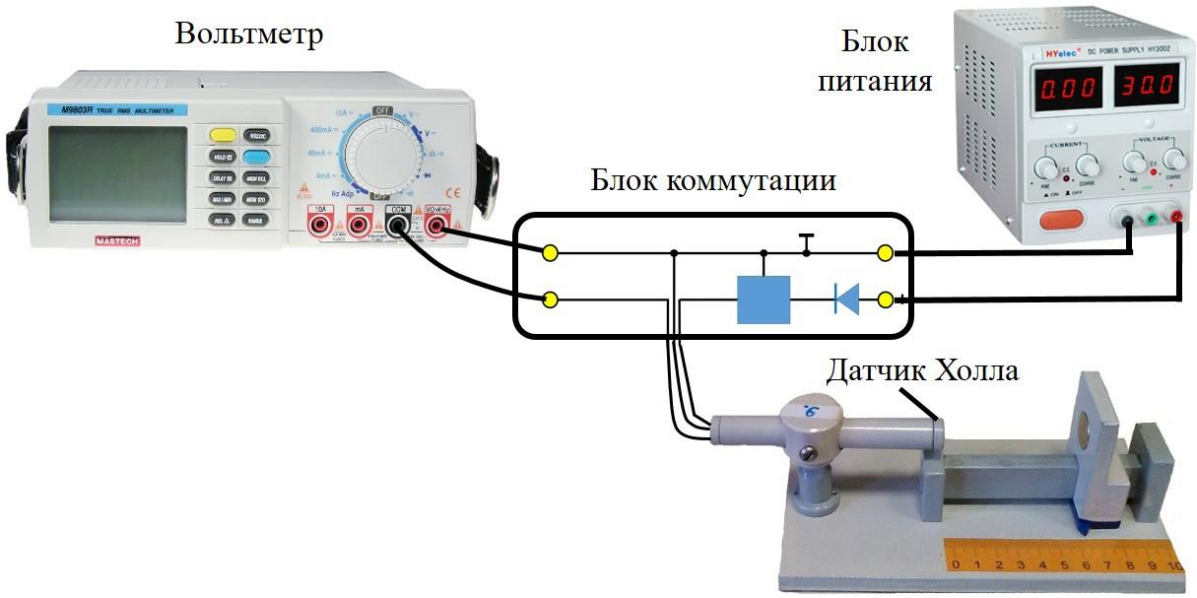


Рис. 5. Блок - схема подключения приборов для калибровки датчика Холла.

Измерения

1. Включите блок питания и вольтметр.

2. Из табл. 1 выберите 5-6 значений индукции магнитного поля B_i и соответствующие им значения d_i.

3. Устанавливая постоянный магнит на различные выбранные расстояния от датчика Холла d_i измерьте с помощью вольтметра получающиеся значения напряжения U_i. **Запишите в табл. 2 значения $U_{Холл} = U_i - U_0$ (U_0 = 2,4 В – постоянное смещение сигнала с датчика) и соответствующие им значения B_i в табл. 2. В случае получения отрицательных значений $U_{Холл}$ их необходимо брать по модулю.**

Таблица 2

d, мм	B, мТл	$U_{\text{Холл}}$, В	k, В/мТл

Обработка результатов

1. Постройте зависимость $U_{\text{Холл}}(B)$, которая согласно (9) должна быть близка к прямой пропорциональности.
2. Методом наименьших квадратов определите угловой коэффициент k зависимости $U_{\text{Холл}}(B)$, который является коэффициентом чувствительности датчика Холла.

Упражнение 3. **Измерение переменного магнитного поля индукционным методом** *(выполняется по указанию преподавателя)***.**

В данном упражнении для измерения переменного магнитного поля используется катушка L_1, а само поле создается соленоидом L_2 (рис. 6).

Рис.6. Основные элементы установки для измерения переменного магнитного поля индукционным методом.

Измерения

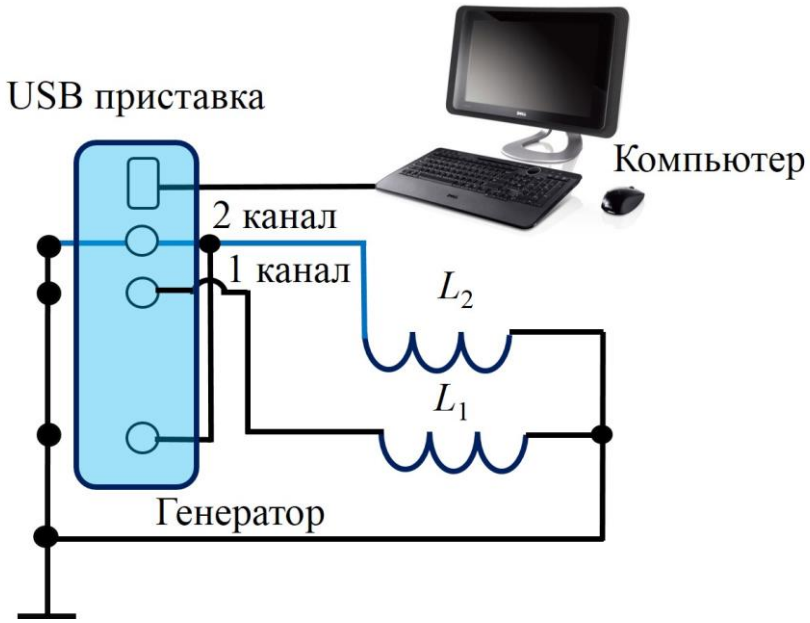


Рис. 7. Блок-схема установки для измерения ЭДС в измерительной катушке.

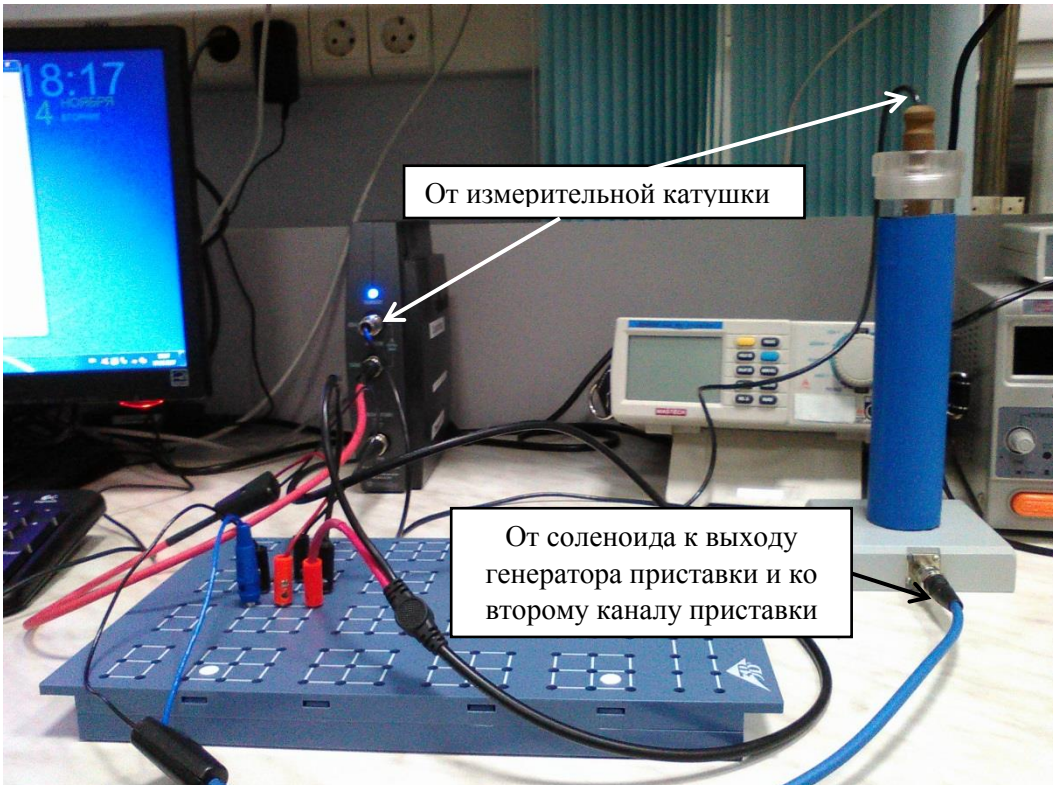


Рис. 8. Схема подключения основных элементов установки для измерения переменного магнитного поля индукционным методом.

1. Соберите электрическую схему согласно рис. 7 и рис. 8. При этом **измерительную катушку L_1 подключите к первому каналу осциллографической приставки USB (*предварительно отключив***

комплектный кабель от первого канала*), а соленоид L_2 – одновременно к выходу генератора и ко второму каналу осциллографической приставки (*используйте ранее отключённый комплектный кабель*)**. Для подключения используйте ***плату с гнездами для установки элементов схем.

2. Запустите программу управления осциллографической приставкой USB (**PcLab2000LT**). На экране осциллографа появится меню для работы с приставкой (рис. 9). Чувствительность осциллографа выберите в *1 вольт на деление*, а размах сигнала с генератора в *10 вольт* (опция *Amplitude*).

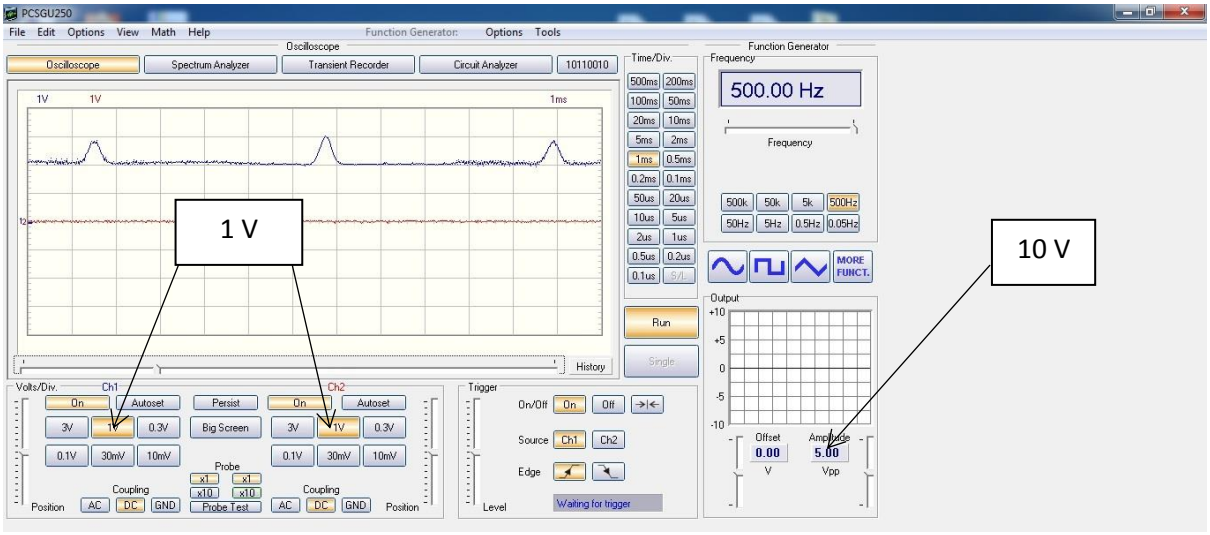


Рис. 9. Общий вид меню программы для работы с осциллографической приставкой USB.

3. При выполнении данного упражнения используется возможность приставки снимать *АЧХ* (*амплитудно-частотную характеристику*) и *ФЧХ* (*фазочастотную характеристику*) в автоматическом режиме. Для его включения нужно в главном окне программы нажать кнопку «*Circuit analyzer*» (Рис. 10).

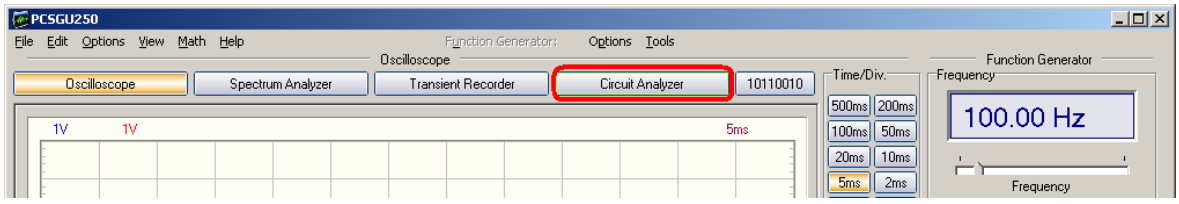


Рис. 10. Включение режима регистрации АЧХ.

4. После этого появится окно анализатора характеристик (рис. 11). Установите

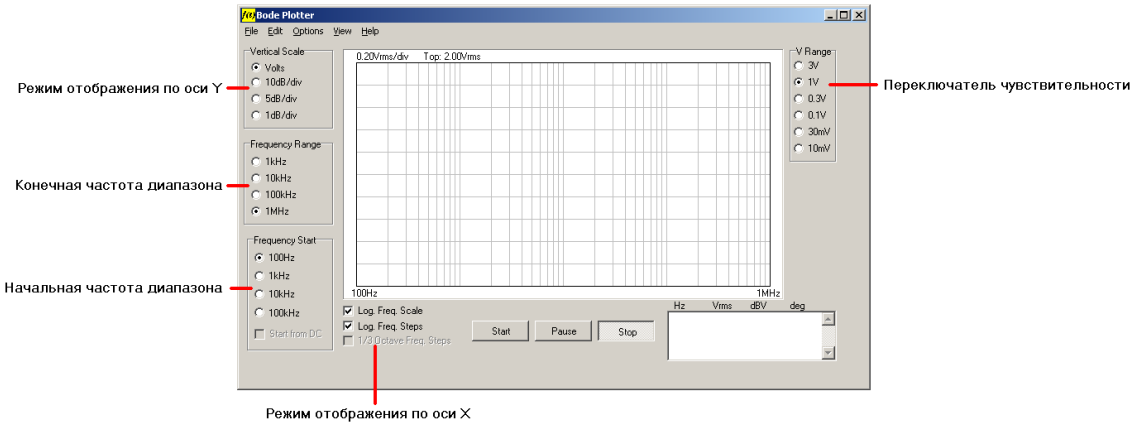


Рис. 11. Окно анализатора характеристик.

начальную частоту диапазона измерений *100 Гц*, а конечную – в *1 МГц* (см. рис. 12).

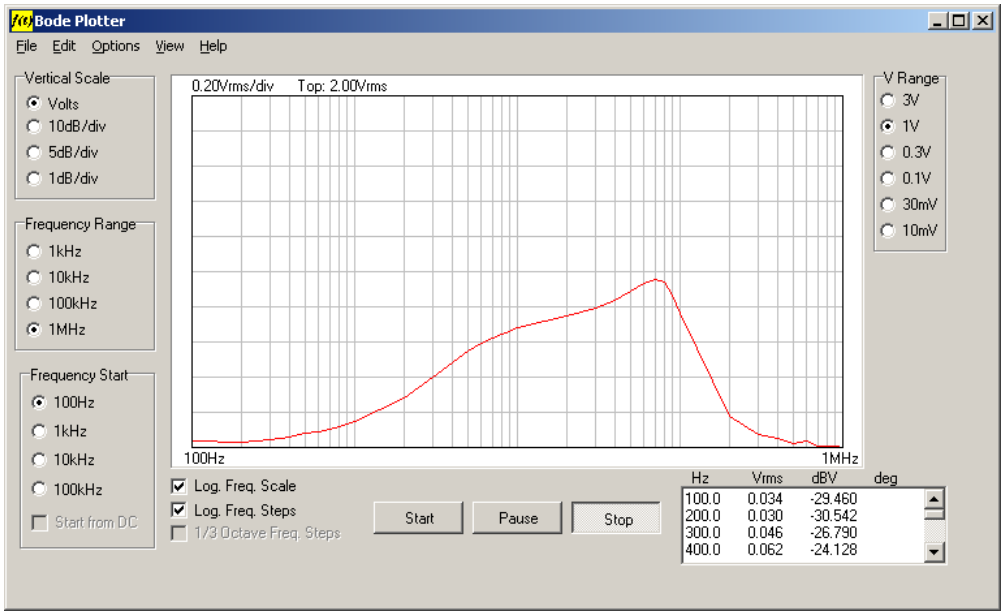


Рис. 12. Основные параметры для работы с анализатором характеристик осциллографической приставки USB.

5. Для проведения измерений при автоматической нормировке выходного сигнала ко входному в меню *Options* необходимо поставить галочки на пунктах: ***Normalize Output by Input, Show Multiple Traces* и *Automatic Voltage Scale*.** Чувствительность первого и второго каналов выберите в *1 Вольт на деление*. Для записи результатов запустите *анализатор характеристик* (нажмите *Start*). Результаты измерений отображаются как на графике в центре окна, так и в

таблице в правом нижнем углу. Проведите измерения коэффициента чувствительности датчика k **для следующих значений размаха сигнала** $U_{ген}$ с генератора: *1, 3, 5, 7 и 9 В*. **В качестве коэффициента *k* используйте значения столбца *Vrms* (в вольтах) в окне анализатора характеристик (рис. 12), которые следует нормировать к размаху сигнала $U_{ген}$ с генератора (рис. 9).** Сохраните полученные данные: для этого выберите пункт *Save Data* в меню *File* (см. рис. 12).

6. **Отсоедините комплектный кабель от соленоида и подсоедините его к первому каналу осциллографической приставки, предварительно отключив от него кабель от измерительной катушки.** Разберите оставшуюся часть схемы.

Обработка результатов

1. Постройте зависимости k от частоты υ для различных значений размаха сигнала $U_{ген}$ с генератора (*1, 3, 5, 7 и 9 В*).
2. Постройте зависимости k от $U_{ген}$ для трех фиксированных значений частоты υ: 100, 1000 и 10000 Гц.

Упражнение 4. **Измерение угловой скорости вала электромотора постоянного тока в зависимости от приложенного к мотору напряжения**

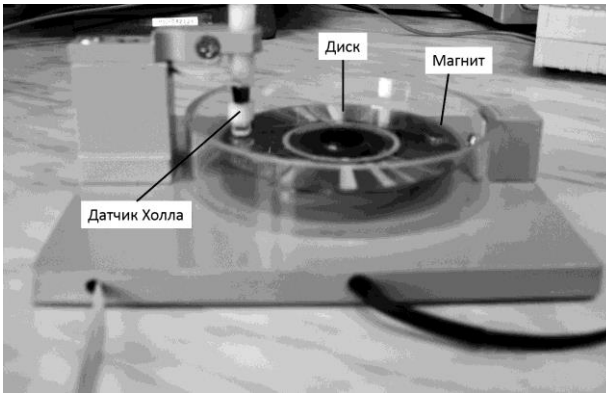


Рис. 13. Внешний вид измерительного модуля: диск с закрепленными магнитами и датчик Холла.

В данном упражнении для измерения скорости вращения вала электромотора применяется следующий метод бесконтактного измерения частоты вращения, идея которого заключается в следующем. Перпендикулярно оси вращения жестко укрепляется диск с постоянными магнитами (рис. 13), равномерно закрепленными по его поверхности (на краю). При своем движении эти магниты периодически проходят через датчик Холла. В результате этого датчик Холла генерирует последовательность импульсов, частота которых определяется частотой вращения и числом магнитов (в данной установке их 2).

Блок-схема установки, используемой в данном упражнении, изображена на рис. 14, а внешний вид установки на рис. 15.

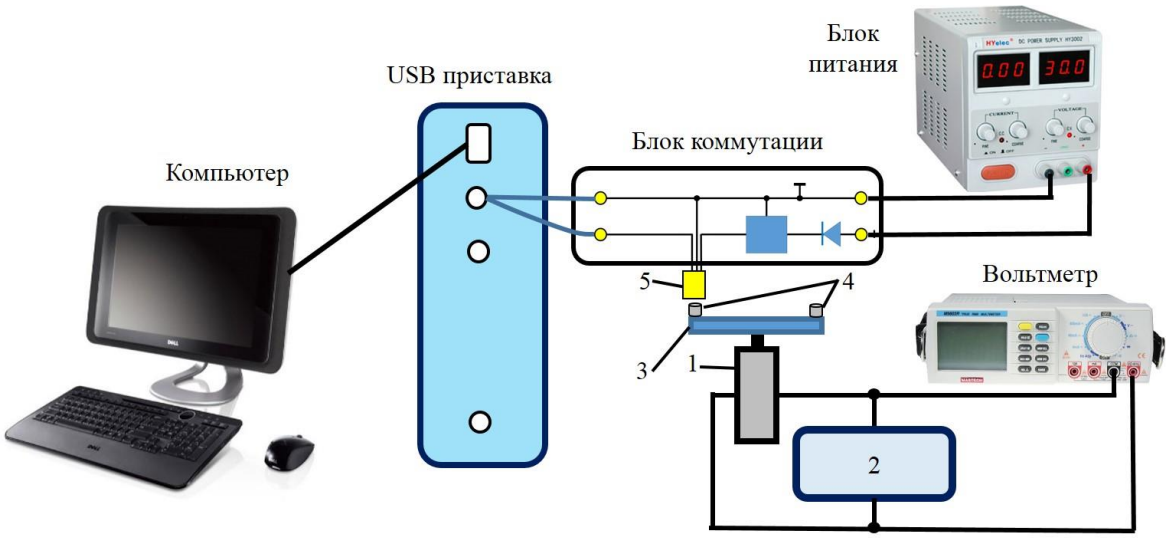


Рис. 14. Блок – схема установки для измерения скорости вала электродвигателя.

Электромотор постоянного тока *1* питается от регулируемого блока питания *2*. На валу мотора укреплен легкий диск *3*, по краю которого закреплены два магнита *4*. Магниты на диске *3* пересекают датчик Холла *5*, который формирует импульсы, поступающие через блок коммутации на осциллографическую приставку USB, соединенную с компьютером. Напряжение на моторе измеряется вольтметром.

Рис. 15. Внешний вид установки для измерения угловой скорости вала электромотора.

Измерения

1. Соберите экспериментальную установку в соответствии с рис.16.

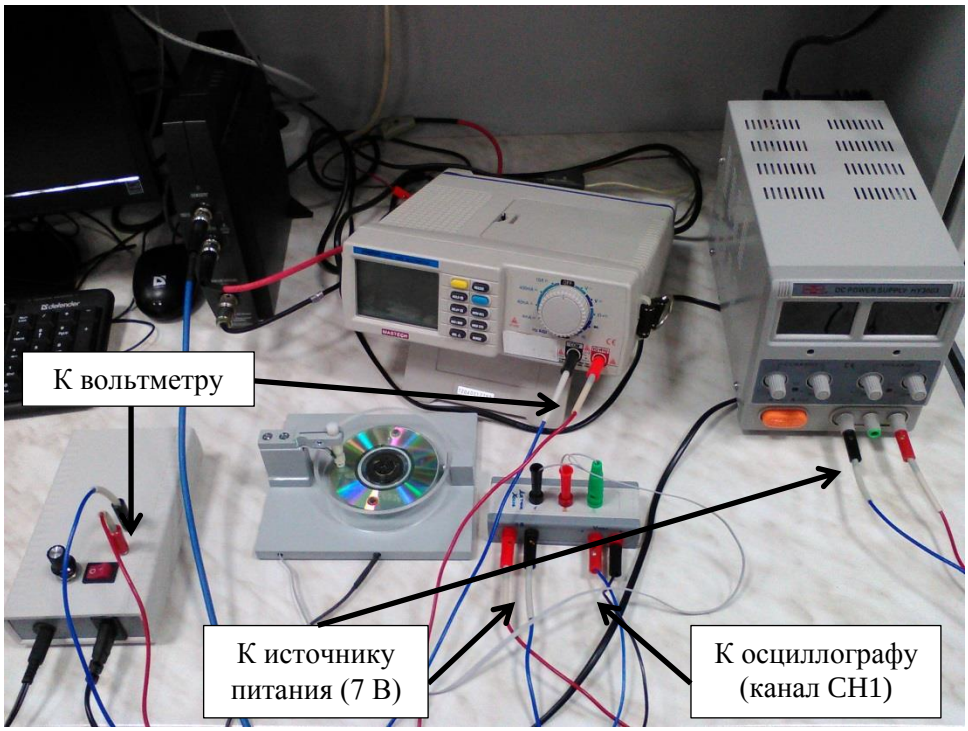


Рис. 16. Схема подключения устройств при измерении угловой скорости вала электромотора.

2. Запустите программу управления осциллографической приставкой USB (**PcLab2000LT**). Установите в интерфейсном окне программы параметры, показанные на рис. 17.

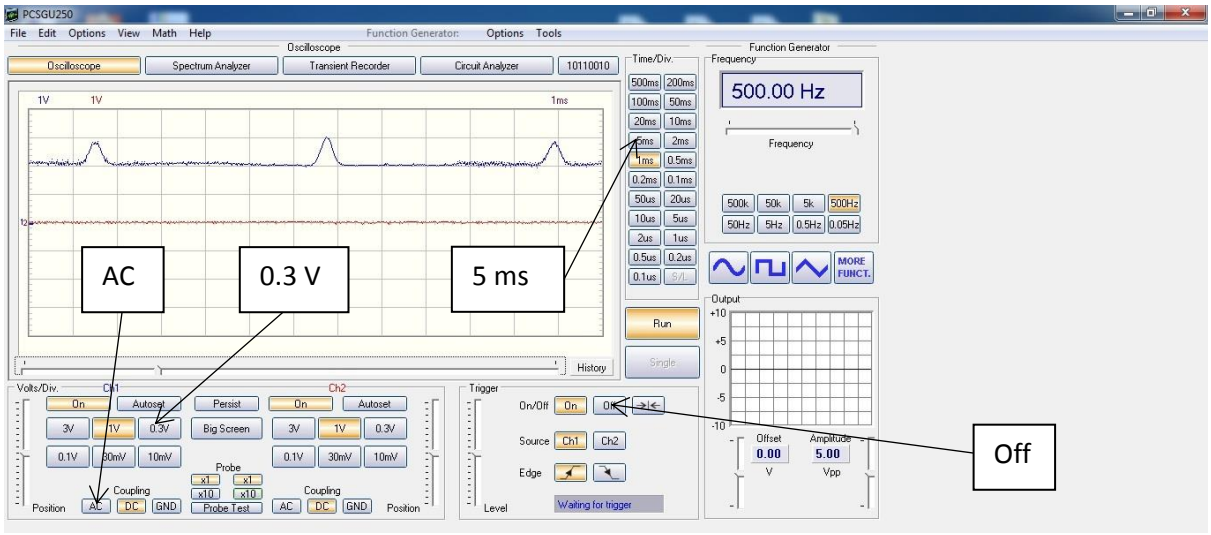


Рис.17. Наблюдение сигнала с датчика Холла.

3. Подайте на мотор напряжение $U \geq 0{,}8$ В и дождитесь стабильного вращения диска. Отрегулируйте развёртку и положение сигнала (ползунком) так, чтобы на экране компьютера наблюдалась чётко выраженная последовательность

импульсов (два-три импульса) (см. рис. 17). Нажмите на кнопку "**Run**" для получения неподвижного изображения.

4. Определите время $t_Д$ между двумя импульсами. Результат запишите в табл. 3.

Таблица 3

U, В	σ_U, В	$t_Д$, с	$\sigma_{t_Д}$, с	ω, $с^{-1}$	σ_ω, $с^{-1}$

5. Изменяя напряжение на моторе с шагом 0,2 В до значения ≥ 1,8 В, измерьте значения $t_Д$. Запишите эти значения, а также значения напряжения с вольтметра в табл. 3.

6. По окончании работы подготовьте вашу установку для **выполнения второго упражнения**. **Измерительный модуль от блока питания электродвигателя не отключайте!**

Обработка результатов

1. Вычислите погрешности $\sigma_{t_Д}$ и σ_U. Погрешность $\sigma_{t_Д}$ вычислите с учетом приборной погрешности $\sigma_{приб}$ (5% от измеряемой величины, если она не менее 1 деления – клетки на экране компьютера) и погрешности считывания $\sigma_{счит}$ (с учетом мелких делений 0,2 клетки на экране компьютера)

$$\sigma_{t_Д} = \sqrt{\left(\sigma_{приб}^{t_Д}\right)^2 + \left(\sigma_{счит}^{t_Д}\right)^2}.$$

Для определения σ_U вольтметра (мультиметр M9803R) используйте табл. 4. Результаты запишите в табл. 3.

Таблица 4.

Погрешности для постоянного напряжения, измеренные мультиметром M9803R

Диапазон	σ_U, мВ
400 мВ	±(0.3% X+ 0,5)
4 В	±(0.3% X + 2)
40 В	±(0.3% X+ 20)
400 В	±(0.3% X+ 200)
1000В	±(0.3% X+ 2000)
X - измеренная величина.	

2. Вычислите угловую скорость $\omega = \frac{\pi}{2t_{Д}}$ вращения вала мотора для всех значений U и погрешность (считаем, что $\pi = 3{,}14$ установлено без погрешности) σ_{ω}.
3. Постройте зависимость $\omega(U)$ с указанием погрешностей.