



Task Edu

T [Task](#)S [Solution](#)M [Marking scheme](#)

A18

Магнетосопротивление — это зависимость электрического сопротивления образца от величины внешнего магнитного поля. Под его действием траектории заряженных частиц закручиваются, что равносильно уменьшению подвижности частиц, а, следовательно, уменьшению проводимости.

Гигантское магнетосопротивление (ГМС) — это квантовомеханический эффект, наблюдаемый в тонких пленках, которые состоят из чередующихся проводящих ферромагнитных и немагнитных слоев. Численно магнетосопротивление характеризуют величиной

$$\delta(B) = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)}$$

где $R(B)$ — сопротивление образца в присутствии магнитного поля B , а $R(0)$ — в отсутствие магнитного поля.

В основе эффекта гигантского магнетосопротивления лежит рассеяние электронов, зависящее от направления спина. Электроны взаимодействуют со слоями структуры следующим образом. Электроны, чей спин параллелен намагниченности слоя, слабо рассеиваются в нем. Наоборот, электроны, чей спин антипараллелен намагниченности слоя, рассеиваются в нем сильно.

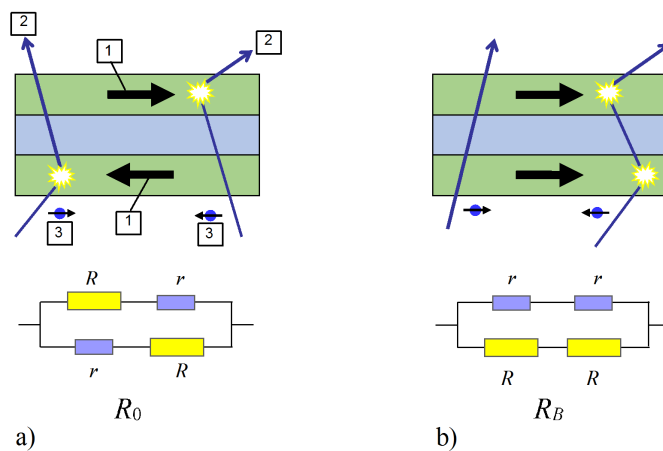


Рис. 1: Модель эффекта ГМС. (1) Направление вектора намагниченности, (2) движение электрона, (3) спин электрона.

В отсутствие магнитного поля соседние ферромагнитные слои обладают спонтанной намагниченностью. Векторы их намагниченности направлены в противоположные стороны. Таким образом, в обоих типах ферромагнитных слоев будет наблюдаться сильное рассеяние электронов, а значит, сопротивление структуры будет высоким (рис. 1а).

В достаточно сильном магнитном поле векторы намагниченности слоев ориентируются в одном направлении, по полю. Проводимость обеспечивается одновременно электронами как со спином параллельным намагниченности, так и антипараллельным ей. Первые почти не рассеиваются, а вторые рассеиваются сильно. Но т.к. эти каналы проводимости «параллельны», а сопротивление одного из них мало, общее сопротивление структуры будет меньше, чем в отсутствие поля (рис. 1б).

На рисунке 1 показаны эквивалентные электрические схемы рассматриваемого эффекта. Большое сопротивление R соответствует движению электронов, которые рассеиваются сильно. Маленькое сопротивление r — электронам, которые рассеиваются слабо. R_0 — полное сопротивление структуры в отсутствие магнитного поля, R_B — в его присутствии. Схемы соответствуют поведению одного ГМС-элемента.

ГМС-датчик магнитного поля

Эффект ГМС применяется при создании датчиков магнитного поля (далее «датчик»). Датчик состоит из 4-х ГМС-элементов, которые соединены в мост Уитстона (рис. 2б). Каждый из ГМС-элементов представляет собой многослойную структуру, которая описана выше. Два из четырех элементов заэкранированы так, что магнитное поле на них не действует. Можно считать, что они не чувствительны к магнитному полю.

Датчик, как изделие, — это чип с 8-ю выводами (рис. 2а). Питание датчика подводится к выводам 4 и 8. Сигнал можно снимать с выводов 1 и 5. Это обычный способ использования датчика. Однако в работе вы можете подключаться к любой паре выводов.

На рисунке 2а указана ось датчика. Датчик чувствителен к полю вдоль этой оси. Датчик не чувствителен к полям, которые перпендикулярны ей.

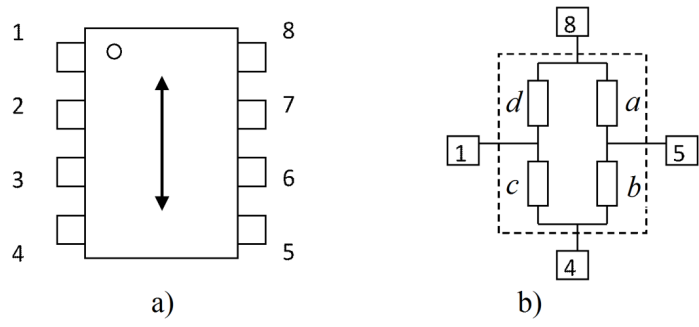


Рис. 2

Цели этого эксперимента

1. Исследование эффекта гигантского магнетосопротивления
2. Исследование самого датчика
3. Исследование применений датчика

Оборудование

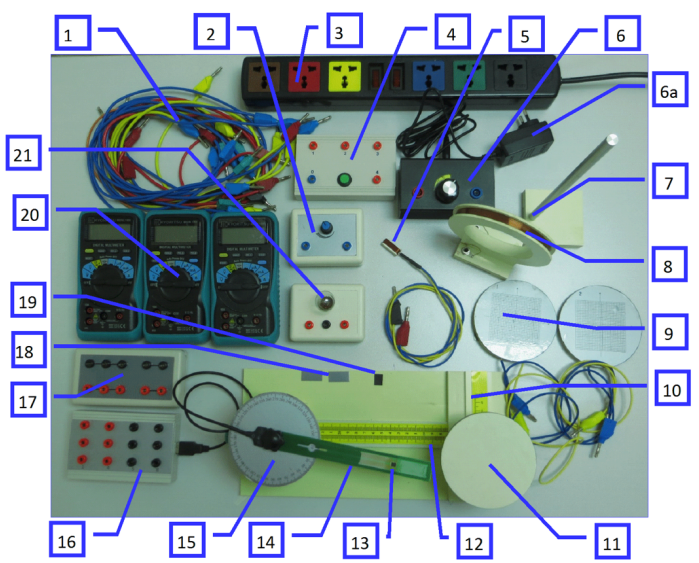


Рис. 3

1	Соединительные провода	12	Скамья
2	Реостат	13	Датчик (магнитного поля)
3	Розетки (220 В)	14	Держатель датчика
4	Набор батареек*	15	Столик с транспортиром (на маленьком штативе)
5	Плоская катушка	16	Блок с выводами датчика*
6	Регулируемый источник тока (с блоком питания [6а])	17	Коммутационная коробка
7	Штатив	18	Прямоугольные ферромагнитные пластины
8	Круглая катушка	19	Квадратный постоянный магнитик
9	Черные ящики	20	Мультиметры* (3 шт.)
10	Поперечный рельс	21	Лампочка
11	Поворотный столик		

Внимание! В розетки можно включать только настольную лампу (не показана на рисунке с оборудованием) и блок питания [ба] регулируемого источника тока. Не включайте в розетку никакое другое оборудование.

А. Расчеты магнитного поля (1 балл)

В этой задаче может быть несколько источников магнитного поля:

- магнитное поле, созданное - электрическим током в круглой катушке; - электрическим током в плоской катушке; - квадратным постоянным магнитиком.
- магнитное поле Земли.

Магнитное поле круглой катушки

Круглая катушка [8] средним диаметром $d = 10.0$ см имеет $N = 500$ витков. Магнитное поле на оси в центре катушки с током I можно рассчитать как магнитное поле кругового витка того же диаметра, но с током $500I$.

A1^{0.50} Магнитное поле в центре круглой катушки может быть записано в виде $B = kI$. Найдите числовое значение k , если B измеряется в мТл, а I — в мА.

Магнитное поле Земли

Магнитное поле Земли присутствует в каждой точке на ее поверхности. В окрестности некоторой точки это поле можно считать однородным. Пусть B_h — горизонтальная компонента магнитного поля Земли.

A2^{0.50} Выберем в горизонтальной плоскости такое направление, которое составляет угол β с горизонтальной компонентой вектора магнитного поля Земли. Пусть B_β — величина магнитного поля, которая измеряется в этом направлении. Запишите выражение для B_β через B_h и β .

Примечание. При измерениях всегда обращайтесь внимание на эффекты, которые могут появиться из-за влияния магнитного поля Земли.

В. Исследование ГМС с помощью датчика магнитного поля (7 баллов)

В этой части вам нужно исследовать зависимость сопротивления каждого элемента датчика от величины внешнего магнитного поля. Установите круглую катушку [8] на скамью [12]. Установите столик с транспортиром [15] на скамью. С помощью винта горизонтально закрепите на столике держатель датчика [14]. Поместите датчик [13] в центр круглой катушки так, чтобы ось датчика была перпендикулярна плоскости катушки. Вы можете менять магнитное поле в области датчика, меняя силу тока в круглой катушке. Удостоверьтесь, что ось датчика направлена вдоль направления Запад-Восток (West-East), которое указано у вас на столе. Это нужно, чтобы магнитное поле Земли не влияло на измерения. Направление Запад-Восток было определено с помощью компаса. Для питания датчика используется набор батареек [4]. Для питания круглой катушки используется регулируемый источник тока [6].

Сопротивление ГМС-элементов датчика

Сопротивление элементов при $B = 0$

B1^{1.25} Изобразите схему экспериментальной установки, которая позволит определить сопротивление каждого элемента. Приведите формулы для расчета сопротивлений элементов исходя из данных, которые вы измерите.

B2^{1.25} Установите ток в круглой катушке $I = 0$. Проведите необходимые измерения, чтобы определить сопротивления элементов. Вычислите сопротивления элементов a, b, c, d при $B = 0$.

Сопротивление элементов в магнитном поле

B3^{0.50} Установите максимальное значение силы тока I через круглую катушку. Проведите необходимые измерения, чтобы определить сопротивления элементов. Вычислите сопротивления элементов a, b, c, d при максимальном значении магнитного поля.

Свойства элементов

B4^{0.25} Укажите элементы, которые чувствительны к магнитному полю.

Характеристики ГМС-элемента

В этом разделе мы исследуем свойства одного из тех элементов, которые чувствительны к магнитному полю. Выберите один такой элемент и определите для него $\delta(B)$ — зависимость относительного изменения сопротивления от внешнего магнитного поля.

B5^{0.75} Укажите элемент, который вы выбрали. Изобразите схему экспериментальной установки, которая позволит снять указанную зависимость. Приведите формулу для расчета $\delta(B)$, исходя из данных, которые вы измерите.

B6^{1.25} Проведите измерения, необходимые для снятия зависимости $\delta(B)$. Изменяйте внешнее магнитное поле B в диапазоне от нуля до максимально возможного. Заполните таблицу измеряемыми величинами, а также значениями силы тока I , магнитного поля B . Рассчитайте соответствующие значения $\delta(B)$.

B7^{0.50} Постройте график зависимости $\delta(B)$ (Graph 1).

B8^{0.25} На некотором участке $\delta(B)$ сильно зависит от B . Определите коэффициент наклона $\alpha = \frac{\Delta\delta(B)}{\Delta B}$ зависимости $\delta(B)$ на этом участке.

B9^{0.25} Определите коэффициент $\delta = \frac{\Delta R_{max}}{R(0)}$ элемента. Здесь ΔR_{max} — максимальное изменение сопротивления в магнитном поле.

B10^{0.75} Определите значения сопротивлений R и r элемента, использованные в модели на рисунке 1. Вычислите отношение $\gamma = r/R$.

С. Исследование датчика магнитного поля (6 баллов)

В этой части вам нужно исследовать наиболее важные характеристики датчика магнитного поля [13]. Поставьте круглую катушку [8] на скамью [12]. Установите столик с транспортиром [15] на скамью. С помощью винта горизонтально закрепите на столике держатель датчика [14]. Поместите датчик [13] в центр круглой катушки так, чтобы ось датчика была перпендикулярна плоскости катушки. Вы можете менять магнитное поле в области датчика, меняя силу тока в круглой катушке. Удостоверьтесь, что ось датчика направлена вдоль направления Запад-Восток (West-East), которое указано у вас на столе. Это нужно, чтобы магнитное поле Земли не влияло на измерения.

Характеристики выходного сигнала датчика

Подайте на выводы 4 и 8 датчика наибольшее напряжение с набора батареек [4]. Подключите круглую катушку к регулируемому источнику тока [6]. Выходной сигнал S датчика — это напряжение между выводами 1 и 5. Измерения в дальнейших пунктах нужно проводить следующим образом:

- Выставьте максимально возможное значение силы тока I через катушку.
- Снимите зависимость сигнала S от I , постепенно понижая значение силы тока в катушке до $I = 0$.
- Поменяйте направление тока в катушке. Снимите зависимость сигнала S от I , постепенно повышая значение силы тока до максимально возможного.
- Снимите зависимость сигнала S от I , постепенно понижая значение силы тока до $I = 0$.
- Поменяйте направление тока в катушке. Снимите зависимость сигнала S от I , постепенно повышая значение силы тока до максимально возможного.

C1^{1.00} Проведите измерения, описанные выше. Заполните таблицу значениями S и соответствующими значениями силы тока I в катушке. Также внесите в таблицу соответствующие значения магнитного поля B .

C2^{1.00} Постройте график зависимости сигнала S датчика от внешнего магнитного поля B (Graph 2).

C3^{0.50}

- Обведите область насыщения на кривой $S(B)$ и обозначьте ее буквой «S».
- Обведите область кривой $S(B)$, в которой график можно считать линейным, и обозначьте ее буквой «L».

Найдите коэффициент наклона $m = \frac{\Delta S}{\Delta B}$ на этом участке.

C4^{0.50} Пусть датчик когда-то был намагничен в обратном направлении до насыщения. По графику зависимости $S(B)$ определите коэрцитивную силу B_c , т.е. такое внешнее магнитное поле, которое нужно приложить, чтобы сигнал S датчика стал минимален.

Примечание. Если в дальнейшем вы захотите воспользоваться линейным участком на графике $S(B)$, можно использовать квадратный магнитик [19]. Поместите этот магнитик на держатель датчика [14] рядом с самим датчиком [13] и, меняя положение магнитика относительно датчика, выберите рабочий диапазон на графике. Как только вы нашли подходящую точку, зафиксируйте магнитик при помощи скотча.

Зависимость выходного сигнала датчика от поданного на него напряжения

Подключите датчик магнитного поля к набору батареек [4]. Вы можете менять подаваемое напряжение E , подключая датчик к разным выходам набора батареек. Силу тока через круглую катушку установите так, чтобы проводить измерения на линейной части кривой $S(B)$.

C5^{0.25} Проведите измерения и заполните таблицу зависимости S от E .

C6^{0.25} Постройте график зависимости S от E (Graph 3).

C7^{0.50} Выходной сигнал S датчика связан с коэффициентом наклона α ГМС-элемента, определенного в пункте В.8. Выведите теоретически эту зависимость. Считайте, что α одинаков для обоих ГМС-элементов, а явлением гистерезиса можно пренебречь. Также считайте, что в отсутствие магнитного поля сопротивления всех четырех элементов одинаковы.

Эффекты, связанные с концентратором потока

Концентратор потока нужен для увеличения магнитного поля. Сделайте концентратор потока из двух ферромагнитных пластин [18]. Для этого расположите пластины по обе стороны датчика на расстоянии L_1 друг от друга (рис. 4). Длину пластин обозначим L_2 .

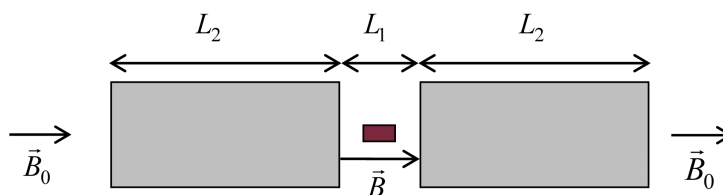


Рис. 4: Схематическое изображение концентратора потока

Если датчик с концентратором потока поместить в однородное магнитное поле индукцией B_0 , то эффективное магнитное поле, действующее на датчик, будет равно B . Тогда в некотором диапазоне L_1 магнитное поле B можно представить эмпирической формулой:

$$\frac{B}{B_0} = n \frac{L_2}{L_1} + 1 \quad (2)$$

Вам нужно провести эксперимент с датчиком магнитного поля и двумя ферромагнитными пластинами [18], чтобы определить значение константы n из уравнения (2).

C8^{1.00} Какое магнитное поле вы будете использовать в этом эксперименте?

1. Поле круглой катушки с током
2. Поле плоской катушки с током
3. Поле постоянного магнетика
4. Магнитное поле Земли

Изобразите схему экспериментальной установки. Приведите формулы для определения значения n исходя из данных, которые вы измерите.

C9^{0.50} Проведите эксперимент для определения B/B_0 при различных значениях L_1 . Занесите результаты измерений в таблицу.

C10^{0.50} Постройте график зависимости B/B_0 от подходящей переменной, чтобы из него определить значение n (Graph 4).

Определите значение n .

D. Применения датчиков (6 баллов)

Измерение магнитного поля Земли

Горизонтальная компонента магнитного поля Земли

Закрепите столик с транспортиром [15] в горизонтальной плоскости. С помощью винта закрепите на столике держатель датчика [14]. Вращая держатель датчика на столике, можно определить горизонтальную компоненту магнитного поля Земли.

D1^{0.50} Изобразите схему экспериментальной установки. Приведите формулу для расчета величины горизонтальной компоненты магнитного поля Земли B_h исходя из данных, которые вы измерите.

D2^{0.25} Проведите измерения и рассчитайте значение B_h .

Величина магнитного поля Земли и магнитное склонение

Магнитное склонение — это угол θ , который составляет вектор магнитного поля Земли \vec{B}_{Earth} с горизонтальной плоскостью.

Закрепите столик с транспортиром [15] в штативе [7] так, чтобы направление Юг-Север лежало в плоскости столика. С помощью винта закрепите на столике держатель датчика [14]. Его можно вращать относительно столика. Для различных направлений оси датчика можно определить проекции вектора магнитного поля Земли.

D3^{0.75} Изобразите схему экспериментальной установки. Приведите формулы для расчета величины магнитного поля Земли B_{Earth} и магнитного наклона θ исходя из данных, которые вы измерите.

D4^{0.50} Проведите измерения и рассчитайте значения B_{Earth} и θ .

Ваттметр

В этой части задачи вам нужно будет сконструировать ваттметр. Для этого плоская катушка [5] подключается последовательно с нагрузкой, чтобы через них протекал одинаковый ток I . Напряжение U , снимаемое с нагрузки, используется для питания датчика. Сам датчик помещается внутрь плоской катушки, в которой током I создается магнитное поле. Выходной сигнал S датчика используется, чтобы определить мощность P , выделяющуюся на нагрузке. В качестве нагрузки используется лампочка с двумя спиралями [21].

Примечание. Балансировка моста Уитстона. В процессе производства датчиков практически невозможно достичь сбалансированного моста, поэтому требуется его балансировка, чтобы его можно было использовать как ваттметр. С помощью винта закрепите держатель датчика [14] горизонтально на столике с транспортом [15]. Подайте на датчик наибольшее напряжение с набора батареек [4]. Выставьте датчик перпендикулярно магнитному полю Земли. Если значение выходного сигнала $S = 0$, то мост сбалансирован и можно приступать к работе. Если $S \neq 0$, подсоедините реостат [2] параллельно к одному из элементов a, b, c, d датчика. Выберите элемент таким образом, чтобы подключенный реостат уменьшал показываемое значение S . Вращая ручку реостата, добейтесь $S = 0$. Приступайте к работе.

В редких случаях реостата недостаточно для балансировки моста. Тогда вы можете повернуть держатель датчика на небольшой угол и добиться $S = 0$.

Примечание. При необходимости вы можете комбинировать три вывода лампочки, чтобы получить другие значения сопротивления нагрузки R_L .

D5^{0.50} Нарисуйте электрическую схему ваттметра, которую вы собираетесь использовать. Помимо прочего, на ней нужно отобразить нагрузку и мультиметры, необходимые при измерениях.

Соберите электрическую схему ваттметра. При необходимости используйте коммутационную коробку [17]. Чтобы получить различные значения напряжения на нагрузке, вы можете менять в широких пределах выходное значение тока регулируемого источника и сопротивление R_L нагрузки.

D6^{0.75} Заполните таблицу, снимая зависимость выходного сигнала S от значений силы тока I через нагрузку и напряжения U на ней. Рассчитайте также соответствующие значения мощности $P = I \cdot U$.

D7^{0.50} Постройте график зависимости $P(S)$ (Graph 5).

D8^{0.25} Кривая $P = f(S)$ называется калибровочной кривой ваттметра. Найдите функцию, которой описывается калибровочная кривая. Определите значения ее числовых параметров.

Разгадывание черных ящиков

Каждый из черных ящиков [9] — пластина текстолита с нанесенной на нее «дорожкой» из проводящего материала. К пластине прикреплен пластиковый диск с напечатанной координатной сеткой.

В этом разделе вам нужно определить форму «дорожек» с помощью датчика.

Можете использовать следующую схему. Столик с транспортом [15], на котором зафиксирован держатель датчика [14], в горизонтальном положении закреплен на маленьком штативе. Черный ящик [9] лежит на поворотном столике [11], который можно вращать в горизонтальной плоскости и перемещать во взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль скамьи [12] или поперечного рельса [10]. Выводы черного ящика подсоединены к регулируемому источнику тока [6]: красный — к «плюсу», черный — к «минусу». Передвигая черный ящик относительно датчика и ориентируясь по изменению показаний дисплея, можно определить положение и форму образованной «дорожкой» фигуры, а также направление тока в ней. Если потребуется, можете воспользоваться напечатанными на листах бумаги координатными сетками большего размера.

D9^{2.00} На Листе ответов зарисуйте схемы «дорожек», находящихся в черных ящиках (в пределах координатных сеток). Укажите направления токов.

Приложение

1. Инструкция по использованию мультиметра

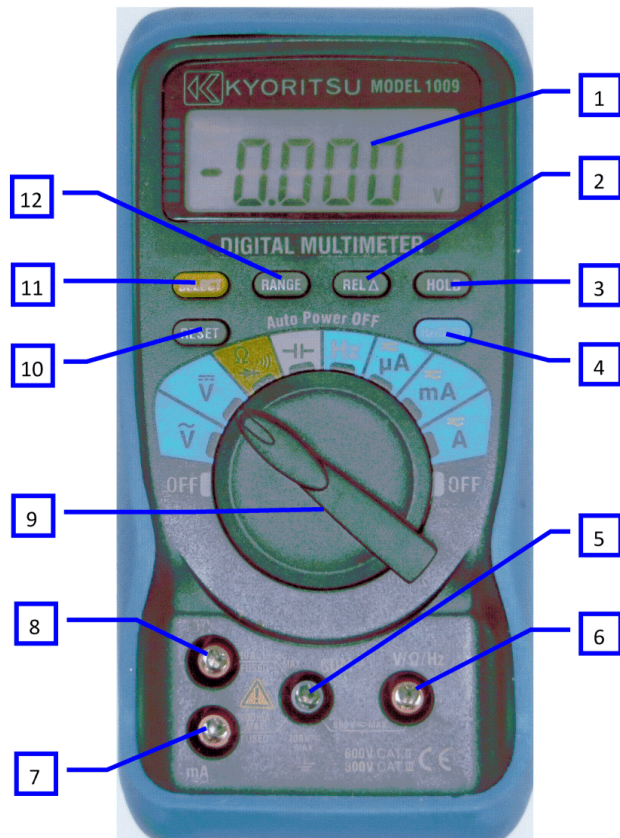


Рис. А1

1	Дисплей	7	Разъем (для режима mA)
2	Кнопка REL	8	Разъем (для режима A)
3	Кнопка HOLD	9	Переключатель режимов
4	Кнопка Hz/DUTY	10	Кнопка RESET
5	Разъем (COM)	11	Кнопка SELECT
6	Разъем (для режимов V/Ω/Hz)	12	Кнопка RANGE

- Во избежание некорректности измерений не рекомендуется использование кнопок: REL, HOLD, Hz/DUTY, RESET.
- Для включения мультиметра и начала измерений поверните переключатель режимов [9] в нужное положение.
- Для измерения напряжения или сопротивления используйте разъем (V/Ω/Hz) [6] и разъем (COM) [5].
- Для измерения тока используйте разъем (A) [8] и разъем (COM) [5].
- Через примерно 30 минут после включения мультиметра он автоматически выключается. Для продолжения измерений поверните переключатель режимов в положение OFF и обратно в нужный режим.

2. Набор батареек

Схема подключения батареек приведена на рис. А2

Батарейки подключены при нажатой кнопке и отключены при отжатой.

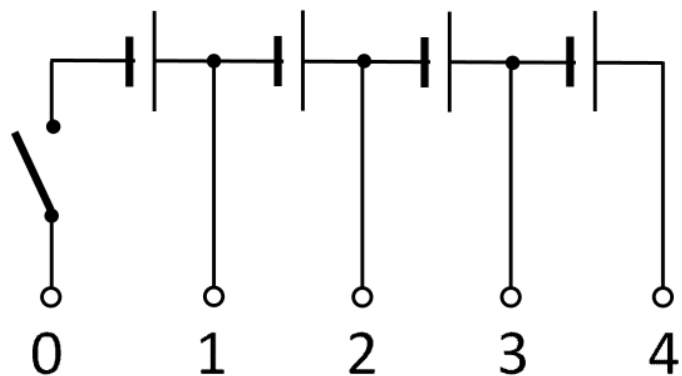


Рис. А2

3. Блок с выводами датчика

Подключите USB кабель, идущий от датчика, к блоку с выводами. Числа, которыми подписаны выводы на блоке, соответствуют выводам датчика на рисунке 2а.

[Е](#) [Электromагнетизм](#) [2018](#) [Азиатские](#) [Магнитное поле](#) [Черный ящик](#)
[Мост Уитстона](#)