

Вычислить угол фазового сдвига между выходным $U_{\text{вых}}$ и входным $U_{\text{вх}}$ напряжением усилителя:

$$\varphi = \arcsin \frac{Y}{Y_{\text{макс}}}$$

Построить график зависимости $\varphi(\lg f)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как происходит усиление сигнала с помощью транзистора в схеме с общим эмиттером?
2. Какие факторы приводят к нелинейности амплитудной характеристики усилителя?
3. Какой вид имеют входные и выходные характеристики транзистора?
4. Какие дополнительные изменения нужно сделать в усилительной схеме с транзистором $n-p-n$ -типа, если заменить его на транзистор $p-n-p$ -типа?
5. Как выбирается рабочая точка на характеристиках транзистора?
6. Какие факторы влияют на частотную характеристику усилителя?
7. Какой вид должна иметь фазовая характеристика идеального усилителя?
8. В чем заключается интегральная технология создания радиосхем и в чем ее достоинства?
9. Что представляет собой микросхема К1УС221А?
10. Нарисовать схему установки и объяснить назначение отдельных ее элементов.
11. Какие правила техники безопасности следует соблюдать при выполнении настоящей задачи?

Литература

1. Брандт А. А., Ржевкин К. С. Техника монтажа и налаживания радиосхем. Изд-во Моск. ун-та, 1966.

ЛАБОРАТОРИЯ МАГНЕТИЗМА

В лаборатории магнетизма студенты изучают физические явления: возникновение магнитного поля в пространстве, окружающем проводники с током, намагничивание и перемагничивание ферромагнетиков, возникновение и изменение доменной структуры ферромагнетиков, ларморову прецессию, проявление магнитной анизотропии, изменение магнитных свойств ферромагнетика с температурой, эффект Холла, эффект Джоуля — Ленца;

изучают физические законы: закон Био — Савара, закон электромагнитной индукции, закон полного тока, теорему Лармора, закон Джоуля — Ленца;

овладевают методами расчета магнитных полей, основанными на законе Био — Савара и на законе полного тока;

овладевают методами измерения величины индукции магнитного поля, индукции насыщения вещества, остаточной индукции, магнитной проницаемости, коэрцитивной силы, точки Кюри, размеров доменов ферромагнетиков, величины постоянной Холла, g -фактора и др.;

приобретают навыки работы с приборами: амперметрами постоянного и переменного тока, источниками питания, автотрансформатором, баллистическим гальванометром, потенциометром постоянного тока, микроверберметром, осциллографом и др.

Лабораторная работа 14

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ИНДУКЦИИ

В настоящей лабораторной работе изучается магнитное поле, создаваемое соленоидом, катушками Гельмгольца, электромагнитом. При измерении величины индукции магнитного поля используется баллистический гальванометр, а также приборы, работа которых основана на эффекте Холла и ядерном магнитном резонансе.

Оборудование экспериментальной установки: соленоид длиной 40 см с числом витков 2000 провода ПЭЛ-0,21; катушки Гельмгольца специальной конструкции, позволяющей передвигать одну из катушек, а также передвигать держатель измерительного датчика по оси катушек и в вертикальном направлении; электро-

магнит с зазором 12 мм при диаметре 100 мм; баллистический гальванометр или микроверберметр, измерители магнитной индукции, работающие на эффекте Холла (Ш1-8) и на ЯМР (Ш1-1), частотомер (Ч1-40), источники питания соленоида, катушек Гельмгольца и электромагнита.

1. МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

При исследовании свойств вещества часто бывают нужны магнитные поля, чтобы воздействовать ими на образцы. Магнитные поля нужны также при исследовании поведения заряженных частиц. При этом в большинстве случаев требуется, чтобы в некоторой области пространства магнитное поле было однородным. Это облегчает исследование явления и упрощает расчеты.

Простейшим устройством, создающим магнитное поле, является проводник с током. В пространстве вокруг него существует поле, индукция которого неоднородна.

Если проводник согнуть в кольцо радиуса R , поле будет тоже неоднородно. Однако если рядом с первым витком соосно расположить второй, то, подобрав расстояние между витками, можно получить довольно протяженную область пространства, где магнитная индукция будет практически одинакова.

Катушками Гельмгольца называют систему двух одинаковых катушек, расположенных друг от друга на расстоянии, равном их радиусу. В пространстве между катушками однородность поля может быть не хуже 0,5%. Катушки Гельмгольца широко применяются в лабораторной практике для создания небольших (до 0,01—0,03 Т) однородных полей.

Индукция магнитного поля в центре тонких катушек Гельмгольца может быть вычислена по формуле

$$B = \mu_0 \left(\frac{2}{\sqrt{5}} \right)^2 \frac{IN}{R} \quad (1)$$

где N — общее число витков двух катушек, I — ток, текущий через катушки, R — средний радиус катушек.

Если намотать провод на цилиндрический каркас, то получится устройство, называемое соленоидом. Ток на оси длинного соленоида (сравнительно с его диаметром) вычисляется по формуле

$$B = 0,5\mu_0 n I (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \quad (2)$$

где n — число витков на единицу длины соленоида, I — ток, протекающий по соленоиду, α_1 и α_2 — углы, под которыми видны концы соленоида из точки на его оси, к которой относится величина B . В случае достаточно длинного соленоида, когда углы α_1 и α_2 близки к нулю, индукцию поля в середине соленоида можно вычислить по формуле

$$B = \mu_0 n I. \quad (3)$$

Магнитное поле, будучи однородным в середине соленоида, к его

концам спадает. Простые соленоиды позволяют получать поля до 0,2 Т. Соленоиды с охлаждением обмотки позволяют получать поля до 10 Т. Через такой соленоид пропускается ток в десятки килоампер, а расход воды для охлаждения составляет сотни кубометров в секунду.

Сверхпроводящие соленоиды обеспечивают получение полей с индукцией в несколько десятков тесла.

Для намагничивания ферромагнитных образцов при исследовании их магнитных свойств широко применяются устройства, называемые тороидами. В технике магнитных исследований так называют устройства, представляющие собой обмотку на тороидальном каркасе. Величина индукции магнитного поля внутри тороида вычисляется, как и для соленоида, по формуле (3).

Для создания постоянных магнитов используются магнитные материалы с большой остаточной индукцией $B_{ост}$ и большой коэрцитивной силой H_c . Если из такого материала изготовить кольцо (ярмо) с зазором, разместить на ярме обмотку, пропустить по ней ток, достаточный для создания поля $H_{нас}$, выключить этот ток, то ярмо перейдет в магнитное состояние при $H=0$ с остаточной индукцией $B_{ост}$, которая может составлять 1,0—1,5 Т. Обмотку после этого удаляют. В ярме будет существовать магнитный поток:

$$\Phi = BS, \quad (4)$$

где S — площадь поперечного сечения ярма. В силу вихревого характера магнитного поля его силовые линии должны быть непрерывны, поэтому они пронизывают и воздушный зазор. Если рассеяние магнитного потока незначительно, то

$$BS = B_z S_z, \quad (5)$$

где B_z — индукция магнитного поля в зазоре, а S_z — площадь поперечного сечения зазора. Если

$$S = S_z, \quad (6)$$

то

$$B = B_z, \quad (7)$$

и, таким образом, в зазоре существует большое магнитное поле, в которое можно помещать объекты исследования.

Достоинствами постоянных магнитов являются стабильность создаваемого ими поля и отсутствие источников питания при эксплуатации. Недостатком — трудность изменения величины поля (путем изменения величины зазора или применением магнитного шунта).

При создании полей напряженностью примерно до 2 Т издавна, в течение многих десятков лет, используют электромагниты.

Если взять ферромагнетик, например железо, замкнутой формы, намотать на него обмотку и пропустить через нее ток, то индукция внутри такого железного сердечника будет значительно больше, чем внутри обмотки без сердечника, а именно

$$B = \mu \mu_0 H, \quad (8)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость железа в поле H , созданном обмоткой.

Если в сердечнике сделать узкий зазор, то индукция в нем будет незначительно отличаться от индукции в сердечнике без зазора. В этот зазор можно помещать исследуемый объект и, таким образом, воздействовать на него сильным магнитным полем.

Рассмотрим электромагнит, длина сердечника которого l , ширина зазора l_3 , обмотка имеет N витков. Пусть по обмотке течет ток I . Применим закон полного тока:

$$NI = Hl + H_3 l_3. \quad (9)$$

Здесь H — напряженность поля внутри сердечника, H_3 — напряженность поля в зазоре. Нас интересует индукция магнитного поля в зазоре B_3 , которая связана с величиной H_3 соотношением

$$B_3 = \mu_0 H_3. \quad (10)$$

Индукция в сердечнике

$$B = \mu \mu_0 H, \quad (11)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

Соотношение (9) перепишем в виде

$$NI = \frac{Bl}{\mu \mu_0} + \frac{B_3 l_3}{\mu_0}. \quad (12)$$

Если рассеянием магнитного потока можно пренебречь, то

$$\Phi = BS = B_3 S_3, \quad (13)$$

где S и S_3 — площади поперечного сечения сердечника и зазора соответственно. В случае

$$S = S_3 \quad (14)$$

имеем

$$B = B_3. \quad (15)$$

Тогда

$$NI = \frac{B_3}{\mu_0} \left(\frac{l}{\mu} + l_3 \right). \quad (16)$$

откуда для интересующей нас величины B_3 получается

$$B_3 = \frac{\mu_0 NI}{l/\mu + l_3}. \quad (17)$$

Если зазор настолько мал, а длина сердечника столь велика, что выполняется соотношение

$$l/\mu \gg l_3, \quad (18)$$

несмотря на то что значение μ может достигать нескольких тысяч, то, пренебрегая в знаменателе правой части соотношения

(17) вторым членом, имеем

$$B_3 = \frac{\mu_0 NI}{l} = \mu_0 nI, \quad (19)$$

где $n = N/l$ — число витков обмотки на единицу длины.

В таком электромагните индукция в зазоре в μ раз больше индукции пустой обмотки.

Если же

$$l/\mu \ll l_3, \quad (20)$$

то из выражения (20) следует

$$B_3 = \frac{\mu_0 NI}{l_3}, \quad (21)$$

т. е. индукция в зазоре тем больше, чем он уже. Именно такие электромагниты наиболее часто используются при исследовании магнитных свойств веществ.

Из выражений (19) и (21) может показаться, что можно получить сколь угодно большую индукцию в зазоре, увеличивая произведение NI . Это не так, потому что магнитное состояние сердечника с зазором определяется не внешним полем

$$H = nI, \quad (22)$$

а внутренним, которое меньше внешнего вследствие размагничивающего действия концов сердечника. Следует также иметь в виду сложный характер зависимости $\mu(H)$.

Все перечисленные методы предназначены для создания стационарного магнитного поля, продолжительность существования которого превышает, по крайней мере, несколько минут. К настоящему времени хорошо развиты методы создания магнитных полей, существующих малые доли секунды, — импульсных магнитных полей. Например, пропуская через соленоид импульс очень большого тока (разряд конденсатора), можно получить поле с индукцией до 100 Т. Для ряда экспериментов продолжительность существования такого поля 1 мс вполне достаточна.

Путем импульсного сжатия (с использованием взрыва) области существования магнитного поля удалось его увеличить до 1200 Т.

2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

2.1. Баллистический метод

Баллистический гальванометр

Баллистический гальванометр применяется для измерения количества электричества, протекающего по цепи за промежуток времени, малый по сравнению с периодом собственных колебаний рамки, и представляет собой особую разновидность гальванометра магнитоэлектрической системы, который описан в лабораторной работе 5. Кратковременные токи имеют место в схемах при

разряде конденсатора, быстром изменении магнитного потока и т. д. Баллистический гальванометр отличается от обычного гальванометра магнитоэлектрической системы искусственным увеличением момента инерции его подвижной системы.

Движение рамки баллистического гальванометра в общем случае описывается уравнением того же типа, как и для обыкновенного гальванометра. Однако так как при измерениях баллистическим гальванометром время протекания тока $\tau \ll T$ — периода собственных колебаний рамки гальванометра (или, вернее, времени первого отброса), то можно считать, что рамка начинает свое движение только после протекания тока, и, таким образом, движение рамки в период времени $t > \tau$ описывается уравнением вида

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = 0. \quad (23)$$

Указанные особенности баллистического гальванометра, обуславливают особый режим его работы и определяют его основные свойства: пропорциональность величины первого отброса рамки количеству электричества, протекшего через нее.

Не прибегая к решению дифференциального уравнения (23), найдем условия работы гальванометра упрощенным путем.

Выведем соотношение между q — количеством электричества, проходящим через обмотку рамки баллистического гальванометра (например, при разряде конденсатора через него), и α_0 — первым максимальным отклонением рамки от положения равновесия при условии отсутствия торможения ($P=0$).

Так как за время τ прохождения тока рамка не успевает выйти из положения равновесия, то уравнение движения за время $t > \tau$ может быть упрощено и записано в виде (см. (3) на с. 34)

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = BnQI, \quad (24)$$

откуда

$$BnQ \int_0^{\tau} I dt = BnQq = J \frac{d\alpha}{dt} \quad (25)$$

Здесь q — полное количество электричества, протекшее через гальванометр. При этом рамка приобретает кинетическую энергию, равную

$$\frac{1}{2} J \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2.$$

Эта энергия затрачивается на закручивание подвеса на угол α .

Момент сил кручения при угле поворота α есть $D\alpha$; при дальнейшем закручивании на угол $d\alpha$ работа сил кручения будет $D\alpha d\alpha$. Вся работа, затраченная на отклонение рамки, будет

$$\int_0^{\alpha_0} D\alpha d\alpha = \frac{D\alpha_0^2}{2}, \quad (26)$$

Таким образом,

$$\frac{D\alpha_0^2}{2} = \frac{1}{2} J \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2, \text{ или } J \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 = D\alpha_0^2. \quad (27)$$

Возводя в квадрат уравнение (25) и деля его на уравнение (27), получаем

$$J = \frac{B^2 n^2 Q^2 q^2}{D\alpha_0^2}. \quad (28)$$

Период свободных колебаний разомкнутой рамки гальванометра

$$T_0 = 2\pi \sqrt{J/D}, \text{ или } J = T_0^2 D / 4\pi^2, \quad (29)$$

подставляя J в уравнение (28), получаем

$$\frac{T_0^2 D}{4\pi^2} = \frac{B^2 n^2 Q^2 q^2}{D\alpha_0^2}. \quad (30)$$

Отсюда

$$q = \frac{T_0}{\pi} \frac{D}{BnQ} \frac{\alpha_0}{2} = \frac{T_0}{2\pi} A\alpha_0, \text{ или } q = A\alpha_0, \quad (31)$$

где $A = CT_0/2\pi$, а C есть динамическая постоянная гальванометра. Величина A называется баллистической постоянной гальванометра.

Приведенный вывод основан на предположении, что рамка при своих колебаниях не испытывает никаких тормозящих воздействий. Практически это не совсем так, поэтому связь между q и α_0 на самом деле несколько сложнее.

Использование баллистического гальванометра для измерения индукции магнитного поля

При измерении индукции магнитного поля к рамке гальванометра подсоединяют измерительную катушку, помещаемую в область пространства, где необходимо измерить величину индукции. Пусть эта катушка содержит N витков при площади их поперечного сечения S . Пусть в момент времени t_1 индукция была B_1 , а в момент времени t_2 индукция стала B_2 . Изменение магнитного потока $\Delta\Phi$ через измерительную катушку при этом

$$\Delta\Phi = (B_2 - B_1)S = \Delta BS. \quad (32)$$

Изменение потокосцепления измерительной катушки

$$\Delta\psi = \Delta\Phi N = \Delta BSN. \quad (33)$$

В течение времени $\Delta t = t_2 - t_1$ в измерительной катушке будет наводиться ЭДС индукции:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\psi}{\Delta t}. \quad (34)$$

В цепи измерительной катушки и рамки гальванометра потечет ток, сила которого I определяется уравнением

$$\mathcal{E} = RI + L \frac{dI}{dt}, \quad (35)$$

где L — суммарная индуктивность катушки и рамки, R — активное сопротивление этой цепи. С учетом (34) уравнение (35) принимает вид

$$-\frac{\Delta\psi}{\Delta t} = RI + L \frac{dI}{dt}. \quad (36)$$

Принтегрируем его по времени в пределах от t_1 до t_2 :

$$\Delta\psi = R \int_{t_1}^{t_2} Idt + LI \Big|_{t_1}^{t_2}. \quad (37)$$

Но $I=0$ при $t=t_1$ и при $t=t_2$, поэтому

$$\Delta\psi = Rq, \quad (38)$$

откуда

$$q = \frac{\Delta\psi}{R} = \frac{\Delta BSN}{R}. \quad (39)$$

Таким образом, при изменении индукции на величину ΔB через рамку гальванометра протечет заряд q .

В соответствии с (31) рамка при этом повернется на угол α_0 :

$$\alpha_0 = \frac{SN}{AR} \Delta B. \quad (40)$$

Изменение индукции ΔB можно получить, изменив ток в системе, создающей магнитное поле (в соленоиде, тороиде, электромагните и т. п.). Обычно при измерении индукции баллистическим методом ток меняют от I до $-I$ (т. е. коммутируют) или от I до 0.

Когда изменение индукции магнитного поля нежелательно, прибегают к повороту измерительной катушки на угол π , при этом изменение магнитного потока через катушку такое же, как и при коммутировании тока от I до $-I$. Если катушку просто выдернуть из области магнитного поля, магнитный поток через нее изменится так же, как и при изменении тока от I до 0.

Баллистический метод позволяет измерять магнитные поля, индукция которых составляет примерно 10^{-4} Т и более при точности $1 \div 3\%$.

2.2. Измерение индукции магнитного поля с помощью датчиков Холла

Для измерения индукции магнитного поля применяют полупроводниковые датчики Холла. Эффект Холла состоит в следующем. Если кусок полупроводника в виде прямоугольной пластины поместить в магнитное поле с индукцией B и пропустить через него ток плотности j , то между противоположными сторонами пластины возникнет разность потенциалов U . Эта поперечная (относительно j и B) разность потенциалов пропорциональна плотности токов j , магнитной индукции B и расстоянию между соответствующими гранями пластины d :

$$U = RdjB, \quad (41)$$

где R — постоянная, зависящая от свойств полупроводника. Ее называют постоянной Холла для данного полупроводника.

Таким образом, если такую пластину поместить в область пространства, где существует магнитное поле неизвестной величины, то при постоянном токе плотности j через пластину, зная его размеры и постоянную Холла R , можно, измерив холловскую разность потенциалов, на основании соотношения (41) определить величину индукции магнитного поля B .

Применение датчиков Холла не требует для измерения индукции магнитного поля изменения его величины. Это является преимуществом холловского метода по сравнению с баллистическим. С помощью датчиков Холла измеряются поля с индукцией примерно 10^{-6} Т и выше при точности $1 \div 2\%$. Достоинством датчиков Холла являются их малые размеры, а также малая инерционность, т. е. независимость от частоты, что позволяет с их помощью измерять переменные поля, частота которых достигает 10^{10} Гц.

2.3. Измерение магнитной индукции методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР)

Все упомянутые выше методы измерения индукции магнитного поля позволяют проводить измерения с точностью не лучше 1% . Существует ряд физических явлений, которые позволяют достичь гораздо более высокой точности. Одно из таких явлений — ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Ядро каждого атома обладает магнитным моментом M_n . Природа магнитного момента любой частицы такова, что при помещении частицы в магнитное поле с индукцией B момент прецессирует относительно этого поля с частотой, называемой частотой Лармора:

$$\Omega = \lambda B. \quad (42)$$

Возбужденное каким-либо образом прецессионное движение магнитного момента долго продолжаться не может. Наличие тор-

мозающих сил различной природы приводит к тому, что энергия прецессирующего магнитного момента тратится на совершение работы против этих сил. В результате угол прецессии быстро уменьшается, а энергия прецессионного движения переходит в тепло. Эти потери энергии можно компенсировать, если на систему прецессирующих магнитных моментов наложить переменное поле $b = b_0 \cos \omega t$ круговой поляризации (вектор b вращается с частотой ω), перпендикулярное постоянному полю B . При этом потери энергии прецессионного движения момента M_n будут восполняться за счет энергии поля b (в случае, если вращение вектора b совпадает по фазе с прецессией вектора M_n). При изменении частоты ω этого поля b будет меняться эффективность подкачки энергии от него к прецессирующему моменту M_n , и угол прецессии будет меняться при этом резонансным образом. При совпадении частоты ω с ларморовской частотой Ω угол прецессии θ будет максимальным. Максимальным будет и отбор энергии ΔW от поля b . С помощью радиоаппаратуры этот отбор энергии легко зарегистрировать и тем самым определить ларморовскую частоту Ω прецессии магнитных моментов ядер. Частота — наиболее точно измеряемая характеристика физических явлений. Точность определения частоты Ω зависит от остроты резонансной кривой $\Delta W(\omega)$. Чем уже эта кривая, тем более точно можно определить частоту Ω . По природе самого явления сигнал ЯМР весьма узок. Но измеряемые поля, к сожалению, часто недостаточно однородны. Это приводит к тому, что разные части ампулы с веществом, от ядер которого необходимо наблюдать резонанс, оказываются в несколько различном магнитном поле. Так как сигнал наблюдается от всей ампулы, он оказывается размазанным, вследствие чего положение вершины этого сигнала определяется менее точно. Вместе с уширением сигнала имеет место уменьшение его амплитуды, т. е. неоднородность поля может оказаться столь велика, что сигнал не удастся обнаружить. Таким образом, метод ЯМР годится для измерения только достаточно однородных магнитных полей.

Величина Λ , входящая в выражение (42), представляет собой так называемое магнетомеханическое отношение (гиромагнитное отношение), т. е. отношение магнитного момента рассматриваемого ядра к его механическому моменту. Это отношение измерено практически для всех ядер с очень высокой степенью точности (лучше $10^{-4}\%$).

Таким образом, неизвестная величина индукции магнитного поля B определяется по формуле

$$B = \frac{\Omega}{\Lambda} \quad (43)$$

Метод ЯМР позволяет измерять поля, индукция которых составляет $0,02 \pm 2,5$ Т с точностью $0,01 \pm 0,001\%$.

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

3.1. Катушки Гельмгольца,

Катушки намотаны проводом ПЭЛ-0,31 по 3000 витков каждая (средний радиус ≈ 10 см). Конструкция катушек иллюстрируется рис. 1. Катушка K_1 — неподвижная, катушка K_2 может перемещаться с помощью штурвала $Шт1$. Измерительный датчик прибора Ш1-1 укреплен на стойке $Ст$ и также может перемещаться вдоль оси катушек при вращении штурвала $Шт2$. Датчик может перемещаться по вертикали при вращении кольца K . Для измерения величин перемещений имеются специальные шкалы.

Питание катушек осуществляется от источника УИП-2.

Сила тока через катушки измеряется прибором на лицевой панели источника при соответствующих положениях тумблеров, относящихся к этому прибору.

3.2. Соленоид

Изучаемый соленоид длиной 38,5 см содержит 2900 витков. Питание соленоида осуществляется от специального источника. О силе тока через соленоид можно судить по показаниям прибора на лицевой панели источника.

3.3. Электромагнит

Изучаемый электромагнит расположен на деревянной подставке. Его сердечник выполнен из железа «армко». Ширина зазора 12 мм. При площади поперечного сечения сердечника 6 см^2 пло-

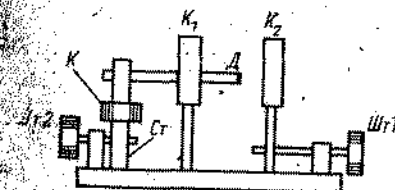


Рис. 1. Устройство катушек Гельмгольца

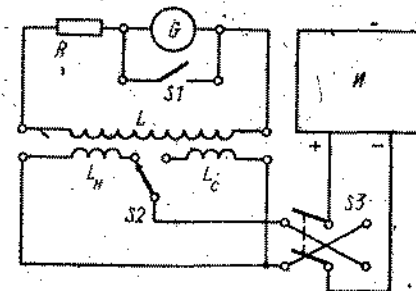


Рис. 2. Схема баллистической установки

щадь поперечного сечения зазора (площадь полюсных наконечников) 50 см^2 . Это сделано для повышения однородности поля в зазоре ценой снижения магнитной индукции в зазоре.

Обмотка электромагнита состоит из двух секций, каждая по 1000 витков провода ПЭЛ-0,41. Между собой секции соединяют-

ся последовательно и подключаются к источнику так же, как и соленоид.

Для измерения индукции в зазоре электромагнита туда введены датчики приборов Ш1-1 и Ш1-8.

3.4. Баллистическая установка

Схема баллистической установки изображена на рис. 2. Здесь G — гальванометр, S_1 — ключ для замыкания гальванометра накоротко при успокоении его подвижной части (рамки), R — магазин сопротивлений для подбора режима работы гальванометра и его чувствительности, L — измерительная катушка, L_c — изучаемый соленоид, L_n — так называемая нормальная (эталонная) катушка, S_2 — ключи для присоединения к схеме питания соленоида либо нормальной катушки, S_3 — ключ для коммутирования тока через соленоид или нормальную катушку, H — источник постоянного тока.

Угол поворота нити, на которой подвешена рамка гальванометра, регистрируется с помощью луча света, отраженного от зеркальца, укрепленного на нити. Луч света создается специальным осветителем (рис. 3). С помощью объектива O на шкале $Ш$ фоку-

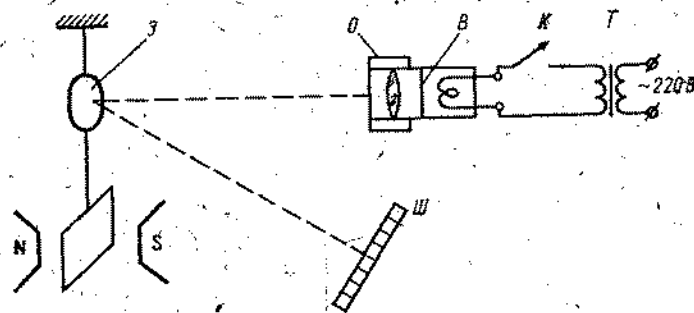


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая действие баллистического гальванометра

сируется изображение визирной линии B . Лампочка осветителя питается от сети ~ 220 В через понижающий трансформатор T . Ее включение производится ключом K .

При повороте нити с зеркальцем на угол α изображение визирной линии сместится на величину

$$x = l \operatorname{tg} 2\alpha. \quad (44)$$

Так как расстояние l между зеркальцем и шкалой значительно больше смещения x изображения визирной линии на шкале, величину этого смещения можно считать пропорциональной углу поворота зеркальца:

$$x \approx 2l\alpha. \quad (45)$$

Баллистический гальванометр в принципе позволяет производить *абсолютные* измерения индукции магнитного поля (абсолютными называют измерения, в которых искомая величина получается в результате измерений величины другого рода). Для этого необходимо только вычислить величину коэффициента A (см. формулу (40)) по конструкционным параметрам гальванометра. Это, однако, не просто. Поэтому широкое распространение получил относительный (сравнительный) метод измерения магнитной индукции с помощью баллистического гальванометра. Он заключается в том, что, располагая эталонным (нормальным) соленоидом, попросту говоря, длинным однослойным соленоидом, поле внутри которого можно достаточно точно *вычислить*, определяют с его помощью так называемую баллистическую постоянную установки, т. е. чувствительность. Затем, зная чувствительность, можно измерять величину индукции других полей.

Для определения баллистической постоянной установки необходимо выполнить измерение индукции магнитного поля в нормальной катушке. Если через нее пропустить ток I_n и прокоммутировать его, то соответствующее изменение индукции магнитного поля в середине нормальной катушки будет

$$\Delta B_n = 2\mu_0 n I_n, \quad (46)$$

где n — число витков на единицу длины нормальной катушки.

Рамка гальванометра повернется на угол α_n (см. формулу (40))

$$\alpha_n = A \frac{SN}{R} \Delta B_n. \quad (47)$$

Соответствующее отклонение изображения визирной линии на шкале (см. формулу (45))

$$x_n = 2lA \frac{SN}{R} \Delta B_n. \quad (48)$$

Обозначим

$$\beta = \frac{2lASN}{R}, \quad (49)$$

тогда

$$\beta = \frac{x_n}{\Delta B}. \quad (50)$$

Таким образом, в правой части этой формулы стоят известные величины, что и позволяет нам вычислить значение баллистической постоянной установки β .

Если теперь ключ S_2 перекинуть в сторону изучаемого соленоида и произвести ключом S_3 коммутацию тока I_c через соленоид, то нить с зеркальцем повернется на угол

$$\alpha_c = A \frac{SN}{R} \Delta B_c. \quad (51)$$

где ΔB_c — неизвестное пока для нас изменение индукции магнитного поля соленоида. Соответствующее отклонение изображения визирной линии на шкале гальванометра x_c :

$$x_c = 2A \frac{SN}{R} \Delta B_c. \quad (52)$$

Используя выражение для баллистической постоянной (49), получаем

$$x_c = \beta \Delta B_c, \quad (53)$$

т. е. для интересующей нас величины ΔB_c имеем

$$\Delta B_c = \frac{x_c}{\beta}. \quad (54)$$

Величина индукции магнитного поля в соленоиде B_c , соответствующая току I_c , определяется формулой

$$B_c = \frac{\Delta B_c}{2} = \frac{x_c}{2\beta}. \quad (55)$$

3.5. Измеритель магнитной индукции Ш1-8

Действие этого прибора основано на измерении ЭДС Холла, возникающей на датчике, помещаемом в область пространства, где существует магнитное поле. Прибор имеет два сменных датчика, один из которых предназначен для измерения поля в зазоре электромагнита (вектор индукции измеряемого поля B должен быть перпендикулярен плоскости датчика), а другой — для измерения поля в соленоиде или катушках Гельмгольца (вектор B должен быть параллелен оси этого датчика). На задней стороне прибора есть специальный разъем, к которому подсоединяется тот или другой датчик.

Основной частью прибора является компенсационная схема. Эта схема, представляющая собой потенциометр, предназначена для измерения ЭДС Холла, поступающей от датчика. Компенсация осуществляется подбором одного из резисторов схемы, конструктивно выполненного в виде многодекадного магазина сопротивлений, ручки декад которого выведены на лицевую панель прибора: «отсчет индукции, Т». Когда измеряемое напряжение окажется скомпенсированным, стрелка индикатора, расположенного на лицевой панели прибора, устанавливается на нуль. При этом в окошках, расположенных рядом с каждой декадой, оказываются цифры, выражающие величину индукции измеряемого магнитного поля.

На лицевой панели прибора расположен тумблер «полярность», с помощью которого можно изменить знак ЭДС Холла, поступающей от датчика в измерительную схему. Измерительная схема сконструирована так, что позволяет компенсировать измеряемое напряжение одной определенной полярности. Полярность ЭДС

Холла зависит от ориентации датчика относительно вектора магнитной индукции B измеряемого поля. Поэтому, когда, вращая ручки магазина сопротивлений, не удастся скомпенсировать ЭДС Холла, следует поменять ее знак с помощью указанного тумблера. Это удобнее, чем изменение ориентации датчика на 180° .

Ручка «коррекция» должна стоять в крайнем положении против часовой стрелки. Ею следует пользоваться лишь при измерении магнитной индукции, превышающей 0,1 Т.

3.6. Измеритель магнитной индукции Ш1-1

Действие этого прибора заключается в регистрации ЯМР. В область пространства, где существует магнитное поле с индукцией B , помещается датчик, представляющий собой конструктивно оформленную катушку индуктивности L , внутри которой расположена ампула с веществом A (рис. 4, а). Магнитные моменты

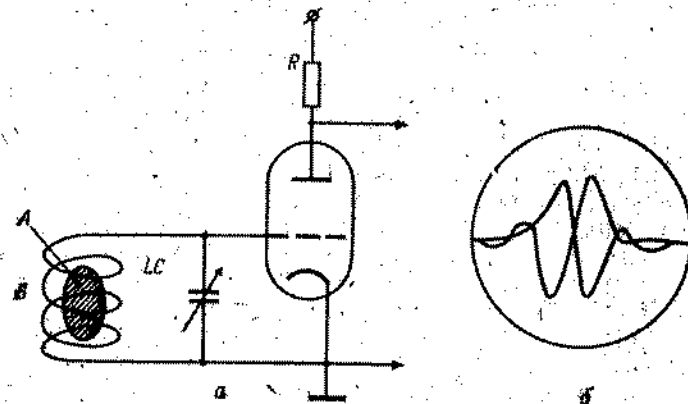


Рис. 4. Принципиальная схема регистрации ЯМР (а) и форма наблюдаемого сигнала (б)

ядер этого вещества и будут отбирать энергию высокочастотного поля, созданного катушкой. Вместе с конденсатором C эта катушка индуктивности образует резонансный контур, подключенный к сетке лампы. Все это образует так называемый автодинный генератор. Он генерирует колебания, частота которых определяется настройкой контура, осуществляемой изменением емкости конденсатора. Анодный ток лампы меняется в зависимости от уровня генерируемых колебаний. Когда частота колебаний будет удовлетворять ЯМР для магнитных моментов ядер вещества в ампуле, будет иметь место отбор энергии колебаний прецессирующими магнитными моментами. Это проявится в снижении уровня колебаний, что приведет к уменьшению анодного тока лампы. При этом изменится падение напряжения на резисторе нагрузки лам-

пы R , что будет зарегистрировано следующими каскадами прибора.

Для удобства наблюдения сигнала ЯМР измеряемое магнитное поле модулируется в небольших пределах с помощью катушки, расположенной в датчике (на рис. 4, а не показана). Амплитуда модуляции в несколько раз превышает протяженность сигнала ЯМР по полю. Через эту катушку пропускается небольшой ток частоты 400 Гц от специального генератора, расположенного внутри прибора. В результате условия ЯМР выполняются дважды за период модуляции (при прохождении результирующим полем области резонанса «слева направо» и «справа налево» по полю). Сигнал ЯМР наблюдается на экране осциллографической трубки, выведенной на лицевую панель прибора. Развертка луча этой трубки по горизонтали осуществляется напряжением от того же генератора модуляции. В результате на экране трубки будет наблюдаться сигнал, подобный изображенному на рис. 4, б. Для этого может оказаться необходимым специальной ручкой «фаза» подрегулировать разность фаз между модулирующим полем и разверткой трубки — эта разность фаз должна быть равной нулю.

Работа с прибором заключается в следующем. Датчик 1 (для измерения полей с индукцией 0,025—0,056 Т) или датчик 2 (для измерения полей с индукцией 0,056—0,13 Т) соединить со специальным кабелем, выходящим из прибора, и поместить в зазор электромагнита, используя специальную втулку для закрепления датчика. Установить ручку «обратная связь» в положение I для датчика 1 или в положение II для датчика 2. После включения прибора в сеть и прогрева в течение 10 мин установить переключатель «ФД-модуляция — генерация» в положение «модуляция» и с помощью ручки «модуляция» установить уровень модуляции величиной 15—20 делений по шкале микроамперметра, расположенного на лицевой панели прибора. Переведя переключатель в положение «генерация», установить ручкой «контроль уровня, генерация» стрелку микроамперметра на 5—10 делений. Для дальнейшей работы переключатель оставить в положении «генерация».

Переключатель «АПЧ, модуляция» должен стоять в положении «выкл.»

Плавной вращая ручку «частота», обнаружить сигнал ЯМР. Установить его в центре экрана, проверив при этом нажатием кнопки «центровка луча» установлена ли линия развертки симметрично относительно центра экрана (если нет, то произвести регулировку соответствующей ручкой). Затем произвести отсчет частоты колебаний по электронному частотомеру, подсоединенному к прибору Ш1-1 специальным кабелем.

Величину измеряемой магнитной индукции B вычислить по формуле (43), где для протонов (именно их магнитные моменты участвуют в прецессии, регистрируемой с помощью датчиков 1 и 2) $1/\Delta = 0,02349$ Т/МГц. Частота в формуле (43) должна быть вы-

ражена в мегагерцах (на табло частотомера она выражается в килогерцах), значение индукции получается в теслах.

Кабель к частотомеру от прибора Ш1-1 подключается к разьему «вход А». При этом переключатель «Род работы» должен стоять в положении « F_A ». Переключатель «время измерения» — в положении «10 μ S». Время индикации отрегулировать с помощью соответствующей ручки таким образом, чтобы оно оказалось удобным для наблюдения.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Упражнение 1. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Определение баллистической постоянной установки

Собрать схему в соответствии с рис. 2. Ключ S_1 с самого начала должен быть замкнут. Ключ S_2 замкнуть на нормальную катушку. Включить источник питания, дать ему прогреться 5 мин. Установить ток через нормальную катушку $I_n = 0,3 \pm 0,7$ А. Включить осветитель гальванометра, установив изображение визирной линии («зайчик») в центре шкалы, используя регулировочные приспособления. Разомкнуть ключ S_1 . Установить изображение визирной нити на нуль шкалы.

Произвести коммутацию тока I_n ключом S_2 и заметить величину отклонения x_n изображения визирной нити на шкале. Записать в рабочей тетради значения I_n и x_n . «Успокоить» подвижную часть гальванометра, замыкая ключ K_1 в момент прохождения «зайчиком» нуля шкалы.

Повторить измерения, произведя коммутацию тока I_n к первоначальному его направлению. При этом отброс x_n произойдет в другую сторону относительно нуля шкалы. Ключ S_1 держать разомкнутым только для выполнения измерений.

Выполнив несколько измерений, усреднить значения отклонений x_n .

Вычислить изменение магнитной индукции ΔB_n в нормальной катушке при коммутации тока по формуле (46). По формуле (50) вычислить баллистическую постоянную установки β (значения параметров установки, входящих в эти формулы, прилагаются к установке).

Измерение индукции поля соленоида

Измерительную катушку переместить в середину изучаемого соленоида. Ключ S_2 замкнуть на соленоид. Установить ток через соленоид $I_c = 0,3 \pm 0,7$ А. Произвести коммутацию тока I_c ключом S_3 и заметить величину отклонения x_c изображения визирной нити на шкале. Записать в рабочей тетради величины I_c и x_c . Выполнив несколько измерений при коммутации тока I_c в ту и другую сторону, усреднить значения отклонений x_c .

Вычислить значение магнитной индукции в соленоиде по формуле (55). Вычислить градуировочную постоянную соленоида:

$$K = \frac{B_c}{I_c} \quad (56)$$

Упражнение 2. ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО КАТУШКАМИ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Измерение индукции магнитного поля одной катушки

Подсоединить к источнику питания одну из катушек (неподвижную) и установить ток через нее $I=0,2$ А.

Включить в сеть измеритель магнитной индукции Ш1-8. Расположить датчик этого прибора по оси катушки и, перемещая его вдоль оси (шаг перемещения 1 см), снять распределение магнитной индукции $B_1(x)$ вдоль оси катушки. Результаты измерений занести в таблицу.

Измерение индукции магнитного поля, создаваемого двумя катушками

Установить вторую катушку на расстоянии R от первой. Соединить обе катушки последовательно и подключить их к источнику питания. Установить ток через катушки $I=0,2$ А.

Перемещая датчик вдоль катушек, снять распределение магнитной индукции $B(x)$ вдоль оси. Результаты измерений занести в таблицу.

Увеличив расстояние между катушками, опять снять зависимость $B(x)$.

Представить графически распределение магнитной индукции, создаваемой одной катушкой $B_1(x)$ и двумя катушками $B(x)$ (на одном листе).

Упражнение 3. ГРАДУИРОВКА ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Подсоединить обмотку электромагнита к источнику питания. Включить в сеть источник питания, измеритель Ш1-8, а также измеритель Ш1-1 и частотомер ЧЗ-44. Увеличивая ток через электромагнит от нуля до $I=0,7$ А через 0,05, для каждого значения тока измерить величину магнитной индукции в зазоре электромагнита. Результаты измерений занести в таблицу.

Когда будет достигнуто значение тока $I=0,50$ А, выполнить измерение индукции для этого значения тока также с помощью прибора Ш1-1 (ЯМР). Для этого, зная значение индукции в этой точке, измеренное с помощью прибора Ш1-8, вычислить предварительно (см. формулу (42)) ожидаемое значение частоты ЯМР. Затем, изменяя частоту колебаний ВЧ прибора Ш1-1 вблизи рассчитанной частоты, обнаружить сигнал ЯМР.

Произвести отсчет частоты Ω на табло частотомера. Вычис-

лить значение индукции магнитного поля, соответствующего установленному току I , по формуле (43).

Далее продолжить снятие градуировочной кривой с помощью прибора Ш1-8.

Градуировочную кривую электромагнита $B(I)$ представить графически, нанеся на график особым образом точку, полученную методом ЯМР.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что такое напряженность магнитного поля, индукция магнитного поля? В каких единицах они выражаются?
2. Вывести формулу, описывающую поле прямолинейного проводника с током, поле витка с током, поле соленоида.
3. Что такое поток магнитной индукции, потокоцепление?
4. Как индукция в зазоре электромагнита зависит от величины зазора и относительной магнитной проницаемости сердечника?
5. В чем заключается баллистический метод измерения магнитной индукции?
6. Показать, что отклонение подвижной части баллистического гальванометра пропорционально заряду, протекшему через рамку гальванометра.
7. Показать, что отклонение подвижной части баллистического гальванометра пропорционально изменению магнитной индукции при коммутировании тока в устройстве, создающем магнитное поле.
8. В чем заключается эффект Холла?
9. В чем заключается ЯМР?
10. Благодаря чему метод ЯМР измерения магнитной индукции имеет высокую точность?
11. Сравнить различные методы измерения магнитной индукции, имея в виду область измеряемых полей, точность измерения, условия измерения.
12. Нарисовать схему баллистической установки и объяснить принцип действия установки.
13. Что такое баллистическая постоянная установки и как ее определяют?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983, § 10, 35, 38, 40.
2. Калашников С. Г. Электричество, М.: Наука, 1977, § 79, 80—82, 84, 91, 94, 105, 120.

Лабораторная работа 15

ИМПУЛЬСНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Цель работы — ознакомление с методом создания импульсного магнитного поля при разряде конденсатора на соленоид.