

# МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ИНДУКЦИИ

**Цель работы** - изучение методов создания и измерения магнитных полей.

В настоящей лабораторной работе изучается магнитное поле, создаваемое электромагнитом, соленоидом, катушками Гельмгольца. При измерении величины индукции магнитного поля используются приборы, работа которых основана на баллистическом методе, эффекте Холла и ядерном магнитном резонансе.

**Оборудование экспериментальной установки:** постоянный магнит, электромагнит, короткий соленоид; баллистический гальванометр, измеритель магнитной индукции, работающие на эффекте Холла (Ш4311) и на ЯМР (Ш1-1), частотомер, источники питания соленоида и электромагнита, катушки Гельмгольца.

## 1. МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

При исследовании свойств вещества часто используют 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 расчёты.

**Постоянный магнит.** Простейший постоянный т. н. подковообразный магнит изображен на рис. 1, а. Для создания постоянных магнитов используют материалы с большой остаточной индукцией  $B_r$  и большой коэрцитивной силой  $H_c$  (рис. 1, б).

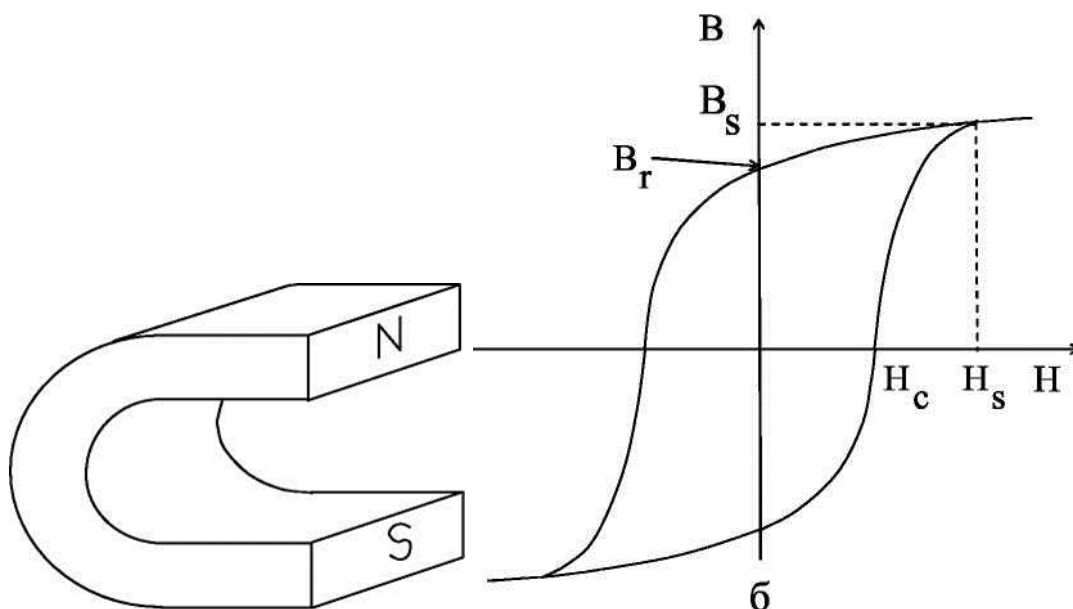


Рис.1. а - подковообразный постоянный магнит; б - петля гистерезиса магнитожесткого материала:  $H_c$  - коэрцитивная сила,  $H_s$  - напряженность магнитного поля насыщения;  $B_r$  - остаточная магнитная индукция,  $B_s$  - магнитная индукция насыщения.

Для того чтобы превратить заготовку из такого материала в постоянный магнит, ее нужно намагнитить, т. е. с помощью внешнего магнитного поля ( $H=H_s$ ) ее надо привести в состояние магнитного насыщения ( $B=B_s$ ) и выключить внешнее магнитное поле ( $H=0$ ) - при этом в заготовке останется остаточная магнитная индукция  $B_r$ , которая и характеризует получившийся постоянный магнит. Такое первоначальное намагничивание осуществляют следующим образом. На заготовку (пусть она имеет форму кольца с зазором (рис.2)) помещают обмотку, пропускают по ней электрический ток, достаточный для создания  $H=H_s$ , затем выключают ток и убирают обмотку - постоянный магнит готов.

В постоянном магните существует магнитный поток  $\Phi = BS$ , где  $S$  — площадь поперечного сечения магнита.

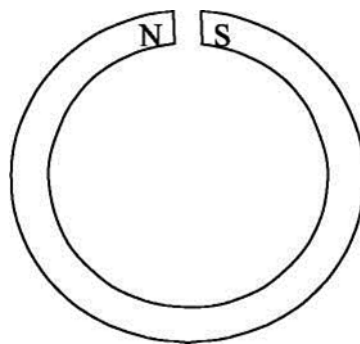


Рис. Кольцеобразный постоянный магнит.

В силу вихревого характера магнитного поля его силовые линии должны быть непрерывны, поэтому они пронизывают и воздушный зазор.

Если рассеяние магнитного потока в зазоре незначительно, то

$$BS = B_{\text{зазора}} S_{\text{зазора}}$$

где  $B_{\text{зазора}}$  - индукция магнитного поля в зазоре, а  $S_{\text{зазора}}$  - площадь поперечного сечения зазора. Если  $S = S_{\text{зазора}}$ , то  $B = B_{\text{зазора}}$  и, таким образом, в зазоре существует большое магнитное поле.

Достоинствами постоянных магнитов являются стабильность создаваемого ими поля и отсутствие источников питания. Недостатком - трудность изменения величины поля, хотя это делают путем изменения ширины зазора и применением магнитного шунта.

Магнитное поле постоянного электрического тока и его силовая характеристика — вектор индукции магнитного поля. По современным физическим представлениям постоянные электрические токи создают вокруг себя магнитное поле. Существование магнитного поля проявляется в силовом воздействии на постоянный магнит или на движущийся в этом поле электрический заряд. Силовой характеристикой магнитного поля в данной точке пространства является вектор индукции магнитного поля  $\vec{B}$ . Магнитная сила, действующая на точечную заряженную частицу, выражается через вектор индукции магнитного поля  $\vec{B}$  в данной точке пространства следующей формулой:

$$\vec{F}_m = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

Здесь  $q$  – величина заряда частицы,  $\vec{v}$  – вектор скорости частицы. Таким образом, в простейшей ситуации описание магнитного поля сводится к заданию вектора индукции магнитного поля  $\vec{B}$  во всех точках пространства. При известном распределении зарядов и токов вычисление вектора индукции магнитного поля  $\vec{B}$  в общем случае проводится путём решения системы уравнений Максвелла электромагнитного поля. В случае системы постоянных электрических токов вычисление вектора индукции магнитного поля  $\vec{B}$  проводится применением закона Био-Савара-Лапласа. Для простейших конфигураций электрических токов: бесконечного прямолинейного тока и кругового витка с током такой расчёт проведен [1]. В частности, рассчитана индукция магнитного поля на оси кольцевого витка

$$B = \frac{\mu\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

Здесь  $I$  – сила тока в витке,  $R$  – радиус витка,  $x$  – координата точки на оси витка.

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 протяжённую область пространства, где магнитная индукция будет практически одинакова.

Одним из основных физических приборов для изучения магнитного поля и хранения магнитной энергии является соленоид — цилиндр радиуса  $R$  и длины  $l$ , на поверхность которого намотаны  $N$  витков провода диаметром  $d$ , по которому пущен постоянный электрический ток силой  $I$ . Соленоид, который мы описали, называется конечным соленоидом, ибо он имеет конечную длину  $l$ . Однако в теоретических рассматриваниях используется идеализация, называемая

бесконечным соленоидом или просто соленоидом, когда цилиндр идёт бесконечно в обе стороны, причём предполагается дополнительно, что диаметр провода  $d$  много меньше диаметра цилиндра  $D = 2R$ , т.е.  $d/D \ll 1$ .

Бесконечный соленоид получается предельным переходом при  $l \rightarrow \infty$  из конечного соленоида. Магнитное поле бесконечного соленоида имеет простую структуру. Внутри соленоида магнитное поле однородно, т.е. во всех точках внутри соленоида вектор индукции магнитного поля  $\vec{B}$  постоянен, направлен по оси соленоида и имеет величину

$$B \equiv B_{\infty} = \mu \mu_0 n I$$

Во всех точках вне соленоида вектор индукции магнитного поля равен нулю.

Магнитное поле на оси соленоида можно рассчитать следующим образом: если выделить малый участок  $dl$  длины соленоида, то на него придется  $ndl$  витков ( $n$  - число витков на единицу длины, равное  $N/L$ , где  $N$  - общее число витков,  $L$  - длина соленоида); обозначая силу тока в каждом витке через  $I$ , можно участок  $dl$  соленоида рассматривать как круговой ток силы  $Indl$ . Индукция магнитного поля в некоторой точке  $A$  на оси соленоида, создаваемая этим участком согласно закону Био-Савара- Лапласа, равна:

$$dB_l = \mu_0 \frac{InR^2}{2(R^2 + l^2)^{3/2}} dl,$$

где  $l$ - расстояние по оси от участка  $dl$  до точки  $A$ ;  $R$  - радиус витка (рис.а).

График функциональной зависимости (1)  $B = B(x)$  индукции магнитного поля  $\vec{B}$  от координаты  $x$  на оси конечного соленоида изображён на рисунке.

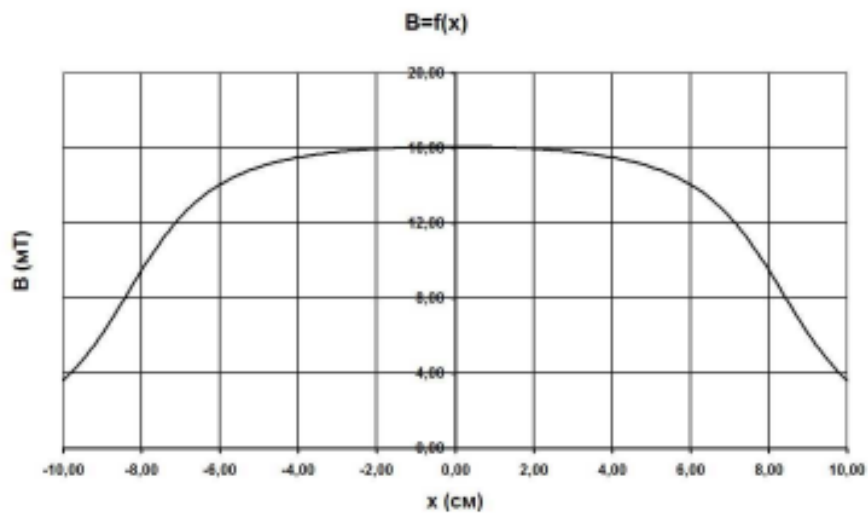


График зависимости  $B = B(x)$  на оси конечного соленоида

Функция (1) — чётная функция аргумента, которая имеет максимальное значение в точке  $x = 0$  и далее монотонно убывает к нулю при  $x \rightarrow \infty$ . Максимальное значение магнитной индукции  $B$  достигается в центре конечного соленоида при  $x = 0$  и согласно формуле (1) равно

$$B_c = \alpha \mu_0 n I,$$

где

$$\alpha \equiv \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{\ell}\right)^2}}$$

**Катушки Гельмгольца.** Так называют систему двух одинаковых катушек, расположенных на расстоянии, равном их радиусу. В пространстве между катушками однородность поля может быть не хуже 0,5 %. Их широко применяют в лабораторной практике для создания небольших (примерно до 0,3 тесла) однородных полей.

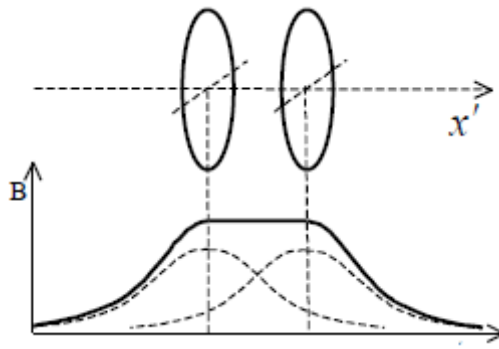


Рис. Расположение двух витков с током и создаваемое ими магнитное поле: пунктирные линии  $B(x)$  – поле каждого витка в отдельности; сплошная линия  $B(x)$  – результирующее поле. Индукция магнитного поля в центре катушек Гельмгольца может быть вычислена по формуле

$$B = \mu_0 \left( \frac{16\pi}{5^{5/2}} \right) \frac{NI}{R} \approx 0,90 \cdot \mu_0 \frac{NI}{R},$$

где  $N$  – общее число витков обеих катушек,  $I$  – сила тока, текущего в катушках,  $R$  – средний радиус катушек.

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для измерения индукции магнитного поля  $B$  используются 3 основных метода: 1) метод ядерного магнитного резонанса, 2) метод измерения, основанный на применении закона электромагнитной индукции, 3) метод измерения с помощью датчика Холла, основанный на использовании эффекта Холла.

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

Ядро каждого атома обладает магнитным моментом  $M_{\text{я}}$ . Природа магнитного момента любой частицы такова, что, будучи помещен в магнитное поле с индукцией  $B$ , он прецессирует относительно этого поля с частотой, называемой частотой Лармора:  $B = \Omega \cdot \gamma$

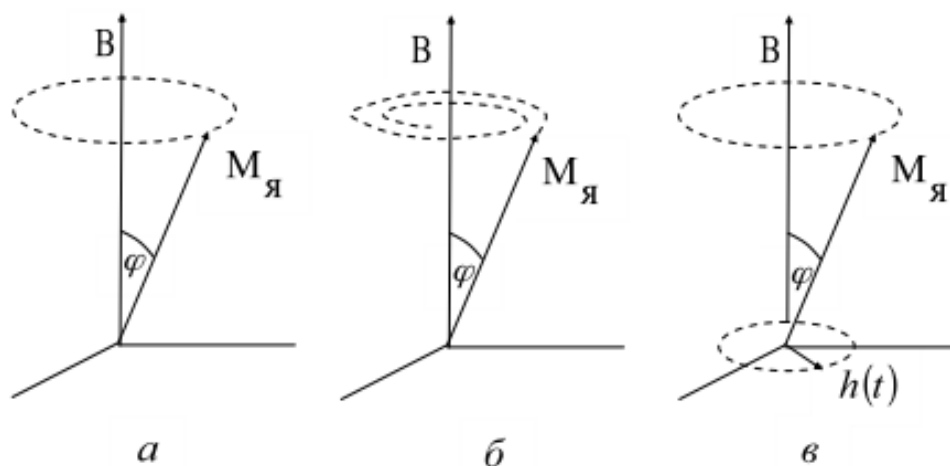


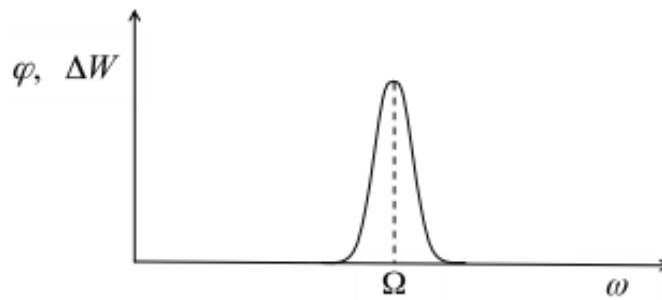
Рис. а – свободная прецессия магнитного момента ядра  $M_{\text{я}}$  относительно вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ ; б – затухающая прецессия вектора  $M_{\text{я}}$ ; в – прецессия вектора  $M_{\text{я}}$  при поддержке со стороны переменного поля  $h(t)$ .

Возбужденное каким-либо образом прецессионное движение магнитного момента долго продолжаться не может вследствие разных причин. Наличие тормозящих сил различной природы приводит к тому, что энергия прецессирующего магнитного момента

$$W = -M_{\text{я}} B \cdot \cos\theta$$

тратится на совершение работы против этих сил. В результате угол прецессии  $\theta$  быстро уменьшается, а энергия прецессионного движения переходит в тепло (рис. б). Эти потери энергии можно компенсировать, если на систему прецессирующих магнитных моментов наложить переменное магнитное поле  $h(t) = h_0 \cos\omega t$ . Вектор  $h$  вращается с частотой  $\omega$ , перпендикулярное постоянному полю  $B$  (рис. в). При этом потери энергии прецессионного движения момента  $M_{\text{я}}$  будут восполняться за счет энергии поля  $h(t)$  (в случае, если вращение вектора  $h(t)$  совпадает по фазе с прецессией вектора  $M_{\text{я}}$ ). При изменении частоты  $\omega$  этого поля  $h(t)$  будет меняться эффективность подкачки энергии от него к прецессирующему моменту  $M_{\text{я}}$ , и угол прецессии  $\varphi$  будет меняться при этом резонансным образом (рис.).





Резонансная кривая прецессии магнитного момента при воздействии на него внешнего переменного поля частоты  $\omega$ .

При совпадении частоты  $\omega$  с ларморовской частотой  $\Omega$  угол прецессии  $\varphi$  будет максимальным. Максимальным будет и отбор энергии  $\Delta W$  от поля  $h(t)$ . С помощью радиоаппаратуры этот отбор энергии легко зарегистрировать и тем самым определить ларморовскую частоту прецессии магнитных моментов ядер. Частота – наиболее точно измеряемая характеристика физических явлений. Точность определения частоты  $\Omega$  зависит от остроты резонансной кривой, изображенной на рис. Чем уже эта кривая, тем более точно можно определить частоту  $\Omega$ . 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 мы хотим наблюдать резонанс, оказываются в несколько различном магнитном поле. Т.к. сигнал ЯМР наблюдается от всей ампулы, он оказывается уширенным, 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  $\gamma$ , входящая в выражение, представляет собой так называемое магнетомеханическое отношение (гиромангнитное 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  $\vec{B}$  определяется по формуле

$$B = \frac{\Omega}{\gamma}$$

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

Измеритель магнитной индукции Ш1-1.

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

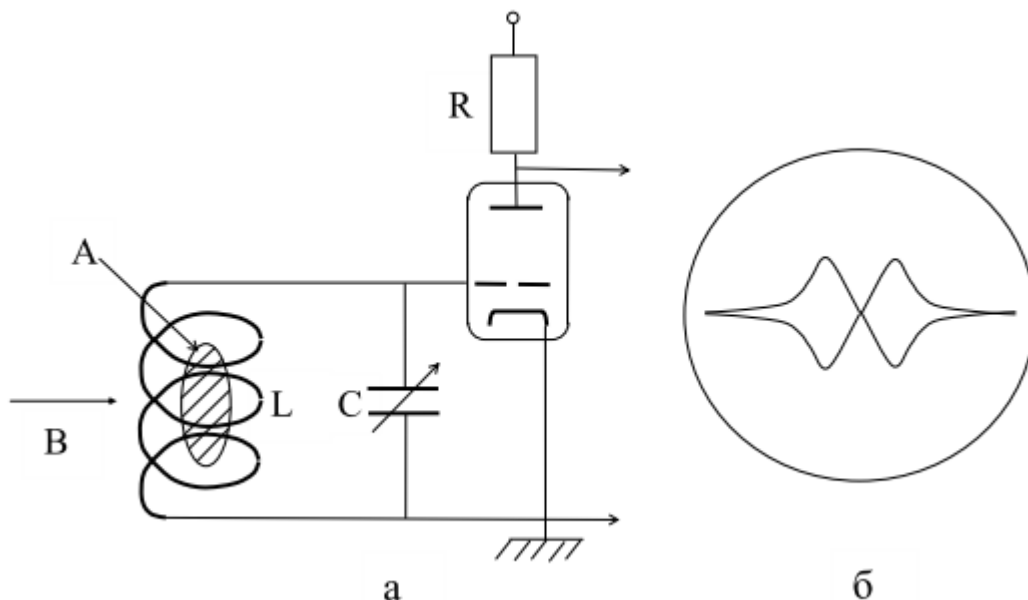


Рис. а – схема автодинного генератора; б – форма сигнала ЯМР, наблюдаемого на экране осциллографа.

Магнитные моменты 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. Всё это образует т. н. автодинный генератор. Он генерирует колебания, частота которых определяется настройкой контура, осуществляемой

изменением емкости конденсатора С. Анодный ток лампы меняется в зависимости от уровня генерируемых колебаний. Когда частота колебаний будет удовлетворять условию 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 R нагрузки лампы, что будет зарегистрировано следующими каскадами прибора.

Для удобства наблюдения сигнала ЯМР измеряемое магнитное поле модулируется в небольших пределах с помощью катушки, расположенной на датчике (на рис. не показана). Амплитуда модуляции в несколько раз превышает протяженность сигнала ЯМР по полю. Через эту катушку пропускается ток частоты 400Гц 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.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 0.025-0.056Т) или датчик 2 (для измерения полей с индукцией 0.056-0.13Т) соединить со специальным кабелем, выходящим из прибора, и поместить в зазор электромагнита, используя специальную втулку для закрепления датчика. Установить ручку «обратная связь» в положение 1 для датчика 1 или в положение 2 для датчика 2.

После включения прибора в сеть и прогрева в течение 10 минут 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». Плавно 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  $\vec{B}$  вычислить по формуле

$$B = \frac{1}{\gamma} f$$

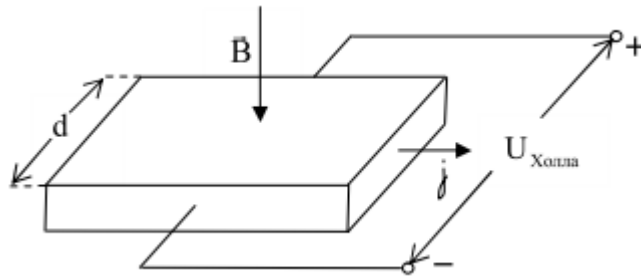
где для протонов (именно их магнитные моменты участвуют в прецессии, зарегистрированной с помощью датчиков 1 и 2)  $1/\gamma = 2349,0 \text{ Т/МГц}$ .

Частота в формуле должна быть выражена в мегагерцах (на табло частотомера она выражается в килогерцах), значение индукции получается в теслах.

Кабель к частотомеру от прибора Ш1-1 подключается к разъему «вход А». При этом «переключатель» род работы должен стоять в положении "F<sub>A</sub>". Переключатель «Время измерения» - в положении «10mS». Время индикации отрегулировать с помощью соответствующей ручки таким образом, чтобы оно оказалось удобным для наблюдения.

## Измерение индукции магнитного поля с помощью датчика Холла.

Для измерения индукции магнитного поля применяют полупроводниковые датчики Холла. Эффект Холла состоит в следующем. Если полупроводник в виде прямоугольной пластины поместить в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  и пропустить через него ток плотности  $\vec{j}$ , то между противоположными сторонами пластины, как показано на рис., возникнет разность потенциалов  $U$ .



К возникновению разности потенциалов Холла  $U_{\text{Холла}}$  в образце, по которому течет электрический ток с плотностью, когда образец находится под действием магнитного поля с индукцией  $\vec{B}$ .

Эта поперечная (относительно  $\vec{j}$  и  $\vec{B}$ ) разность потенциалов пропорциональна плотности тока  $j$ , магнитной индукции  $B$  и расстоянию между соответствующими гранями пластины  $d$ :

$$U = B \cdot j \cdot d \cdot R,$$

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 ее размеры и постоянную Холла  $R$ , можно, измерив холловскую разность потенциалов, на основании соотношения 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 и индукционным. С

помощью датчиков Холла измеряются поля с индукцией примерно  $10^{-6}$  Т и выше при точности ( $1 \div 3\%$ ). 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.

### **Измеритель магнитной индукции Ш4311**

Действие этого прибора основано на измерении ЭДС Холла, возникающей на датчике, который помещают 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 передней стороне прибора есть специальный разъем, к которому подсоединяется тот или другой датчик: ПИП-М или ПИП-С.

Для снижения нестабильности показаний следует включить кнопку ФИЛЬТР.

### **Баллистический метод измерения индукции магнитного поля.**

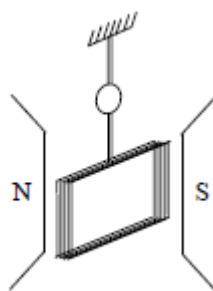
а) Баллистический гальванометр. Баллистическим называют метод измерений, в котором подвижная часть основного измерительного прибора используется в так называемом баллистическом режиме. Это режим соответствует поведению подвижной части прибора после того, как причина, выводящая ее из состояния равновесия, перестает действовать, в то время как другие факторы действовать продолжают. (После вылета снаряда из канала ствола пороховые газы перестают действовать на него, а сила тяжести, сопротивление воздуха и др. продолжают действовать, и снаряд летит, как говорят, по баллистической траектории). В баллистическом гальванометре, устройство которого показано на рис., баллистический режим создают для его

рамки. Рамка подвешена так, что она может вращаться относительно вертикальной оси в зазоре постоянного магнита. К проводникам подвеса прикреплено зеркальце, на которое направлен луч света, на пути которого (еще в корпусе источника света) помещена вертикальная нить. С помощью линзы (также расположенной в корпусе источника) изображение этой нити, получаемое уже с помощью луча, отраженного от зеркальца, фокусируется на горизонтальной полупрозрачной шкале, так что при повороте рамки изображение нити перемещается по шкале.

Пусть рамка гальванометра имеет  $N_2$  витков, площадь поперечного сечения которых  $S$ . Уравнение движения рамки можно записать в виде

$$K \frac{d^2\varphi}{dt^2} = BN_2SI - P \frac{d\varphi}{dt} - D\varphi.$$

Здесь  $K$  – момент инерции рамки,  $\varphi$  – угол ее поворота,  $B$  – индукция поля в зазоре постоянного магнита,  $I$  – сила тока, текущего по рамке,  $P$  – коэффициент, описывающий трение при движении рамки,  $D$  – коэффициент, связанный с противодействием подвеса закручиванию рамки. Таким образом, левая часть уравнения выражает изменение момента количества движения рамки; первый член правой части – момент сил, закручивающих рамку; второй – момент сил трения; третий – момент сил со стороны подвеса, противодействующих закручиванию.



Устройство баллистического гальванометра.

Прибор конструируют таким образом, чтобы момент инерции рамки был достаточно велик, а именно, чтобы при пропускании тока через рамку в течение короткого времени рамка не успела бы выйти из положения равновесия, а

начала бы двигаться только после окончания импульса тока. В этом и заключается баллистический характер движения рамки.

Момент  $D$ , наоборот, стремятся сделать малым (для повышения чувствительности гальванометра).

Рассмотрим движение рамки. Пусть в момент времени  $t = t_1$  через рамку начал протекать импульс тока. При этом

$$\varphi|_{t=t_1} = 0, \quad \left. \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t=t_1} = 0, \quad \left. \frac{d^2\varphi}{dt^2} \right|_{t=t_1} = 0,$$

- рамка покоится. При  $t = t_2 > t_1$  импульс тока кончился, но

$$\varphi|_{t=t_2} = 0, \quad \left. \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t=t_2} = 0, \quad \left. \frac{d^2\varphi}{dt^2} \right|_{t=t_2} = 0,$$

- рамка еще покоится. При  $t > t_2$  рамка движется:

$$\varphi|_{t>t_2} \neq 0, \quad \left. \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t>t_2} \neq 0, \quad \left. \frac{d^2\varphi}{dt^2} \right|_{t>t_2} \neq 0,$$

Теперь вступают в действие силы трения и силы подвеса, противодействующие

закручиванию рамки. В некоторый момент времени  $t = t_3 > t_2$ , рамка, отклонившись на угол  $\varphi$ , остановится, при этом будет

$$\left. \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t=t_3} = 0,$$

Проинтегрируем уравнение в пределах от  $t_1$  до  $t_3$ :

$$K \int_{t_1}^{t_3} \frac{d^2\varphi}{dt^2} dt = BN_2 S \int_{t_1}^{t_3} I dt - P \int_{t_1}^{t_3} \frac{d\varphi}{dt} dt.$$

Соппротивление подвеса мало ( $D \approx 0$ ), и им пренебрегаем. После выполнения интегрирования уравнение приобретает вид:

$$K \left. \frac{d\varphi}{dt} \right|_{t_1}^{t_3} = BN_2 SQ - P \varphi|_{t_1}^{t_3},$$

где  $Q$  – заряд, протекший через рамку за время  $t_2 - t_1$ . Для момента времени  $t_3$  это уравнение можно записать в виде:

$$0 = BN_2 SQ - P\varphi,$$



где  $\varphi$  - угол поворота рамки к моменту ее остановки  $t = t_3$  :

$$\varphi = \frac{BN_2S}{P} Q = AQ,$$

где коэффициент  $A$  определяется конструкцией гальванометра.

Таким образом, угол поворота рамки гальванометра пропорционален заряду, протекающему через нее.

б) 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 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

$$\Delta\Phi = (B_2 - B_1) \cdot S = \Delta B \cdot S.$$

Изменение потокосцепления измерительной катушки

$$\Delta\Psi = \Delta\Phi \cdot N = \Delta B \cdot S \cdot N.$$

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

$$\xi = -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t}.$$

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

$$\xi = R \cdot i + L \frac{di}{dt},$$

где  $L$  – общая индуктивность катушки и рамки,  $R$  - активное сопротивление этой цепи. Тогда уравнение принимает вид

$$-\frac{\Delta\Psi}{\Delta t} = R \cdot i + L \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Проинтегрируем его по времени в пределах от  $t_1$  до  $t_2$  :

$$\Delta\Psi = R \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt + L \cdot i \Big|_{t_1}^{t_2}.$$

Но при  $t = t_1$  и при  $t = t_2$  имеет место  $i=0$ , поэтому

$$\Delta\Psi = RQ$$

откуда

$$Q = \frac{\Delta\Psi}{R} = \frac{\Delta B \cdot S \cdot N}{R}$$

Таким образом, при изменении индукции на величину  $\Delta B$  через рамку гальванометра протечет заряд  $Q$ .

В соответствии с этим рамка при этом повернется на угол  $\varphi$  :

$$\varphi = A \frac{NS}{R} \Delta B.$$

И здесь имеет место пропорциональность между поворотом рамки прибора и изменением индукции магнитного поля.

Изменение индукции  $\Delta B$  можно получить, изменив ток в системе, создающей магнитное поле (в соленоиде, тороиде, электромагните и т.п.). Обычно при изменении 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  $\pi$  – 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 измениться так же, как при изменении тока от  $I$  до 0.

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

Для экспериментального определения магнитной индукции используется метод, основанный на измерении ЭДС электромагнитной индукции, возникающей в измерительной рамке. Рамка находится внутри соленоида, который питается переменным током промышленной частоты ( $\omega=314$  рад/с). Так как ток в соленоиде меняется по гармоническому закону, то магнитная индукция в любой точке на оси изменяется во времени по тому же закону

$$B=B_m \cos \omega t$$

где  $B_m$  – амплитудное значение магнитной индукции.

Рамка закреплена на штоке, который может перемещаться вдоль оси соленоида, а плоскость ее витков перпендикулярна оси. Радиус рамки  $r_p \ll R$ , поэтому магнитную индукцию в пределах плоскости рамки можно считать постоянной. Тогда магнитный поток через площадь рамки будет

$$\Phi = BS_p$$

где  $S_p$  – площадь рамки.

Согласно закону Фарадея-Максвелла в рамке индуцируется ЭДС

$$E = -N_p \frac{d\Phi}{dt}$$

где  $N_p$  – число витков рамки.

Следует

$$E_m \sin \omega t = N_p S_p B_m \omega \sin \omega t$$

Отсюда

$$B_m = \frac{E_m}{N_p S_p \omega}$$

Это же выражение справедливо и для действующих значений магнитной индукции и электродвижущей силы.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомится с описанием прибора Ш1-1.
2. Провести измерение индукции магнитного поля в зазоре постоянного магнита.

3. Включить катушки Гемгольца и измерять индукции магнитного поля в зазоре постоянного магнита при нескольких значениях тока катушек Гемгольца.
4. Переключить полярность питания катушек Гемгольца. Измерять индукции магнитного поля в зазоре постоянного магнита при нескольких значениях тока.
5. Построить график зависимости индукции магнитного поля в зазоре постоянного магнита при различных значениях тока катушек Гемгольца.
6. Ознакомиться с порядком работы прибора Щ4311.
7. Подключить датчик ПИП к прибору.
8. Провести измерение индукции магнитного поля постоянного магнита.
9. Сравнить полученные значения.
10. Провести измерение индукции магнитного поля в зазоре постоянного магнита с включенными катушками Гемгольца.
11. Построить график.
12. Собрать схему питания электромагнита.
13. Провести измерения индукции магнитного поля в зазоре электромагнита в зависимости от величины тока электромагнита.
14. Построить график зависимости индукции магнитного поля в зазоре электромагнита при различных значениях тока.
15. Заменить датчик в приборе Щ4311.
16. Провести измерения индукции магнитного поля в многовитковом соленоиде в зависимости от величины тока.
17. Построить график зависимости индукции магнитного поля в многовитковом соленоиде в зависимости от величины тока.
18. Установить фиксированное значение тока в многовитковом соленоиде (данные у преподавателя). Провести измерения индукции

магнитного поля в многовитковом соленоиде в зависимости от координаты положения датчика в соленоиде.

19. Построить график зависимости индукции магнитного поля в многовитковом соленоиде в зависимости от координаты по оси соленоида.

20. Собрать схему для катушек Гемгольца. Установить фиксированное значение тока в катушках Гемгольца (данные у преподавателя). Используя индукционный метод получить значения индукции магнитного поля в зависимости от расстояния между катушками Гемгольца.

21. Построить график зависимости индукции магнитного поля в зависимости от расстояния между катушками Гемгольца.