



**Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова**

Физический факультет

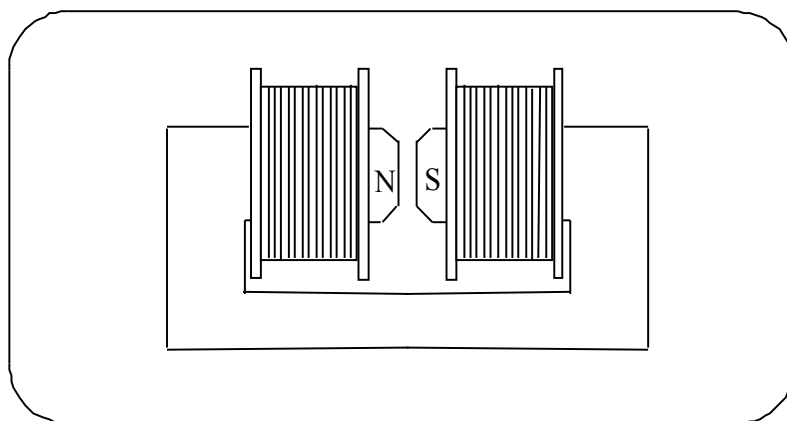
Кафедра общей физики

Лабораторный практикум по общей физике
(электричество и магнетизм)

Козлов В.И.

Лабораторная работа 14-3

Электромагнит



МОСКВА 2006

Лабораторная работа 14-3

Электромагнит

В данной лабораторной работе изучается электромагнит – устройство для создания сильных магнитных полей – и методы измерения индукции магнитного поля, основанные на эффекте Холла и ядерном магнитном резонансе.

Введение

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).

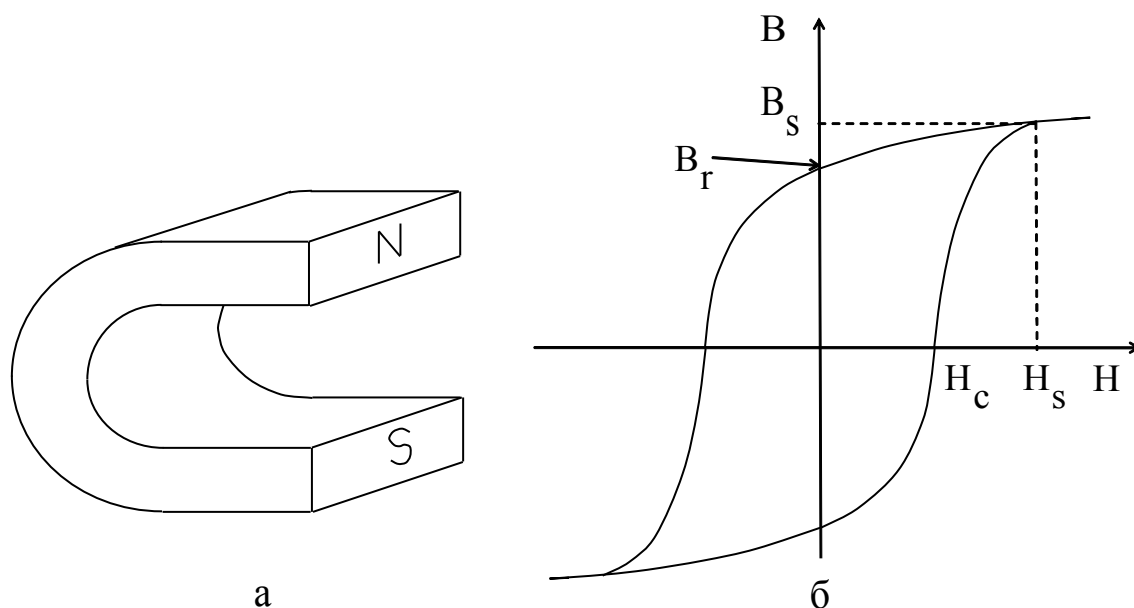


Рис. 1. а - подковообразный постоянный магнит; б - петля гистерезиса магнито жесткого материала: H_c - коэрцитивная сила, H_s - напряженность магнитного поля насыщения; B_r - остаточная магнитная индукция, B_s - магнитная индукция насыщения.

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

$$\Phi = BS, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения магнита.

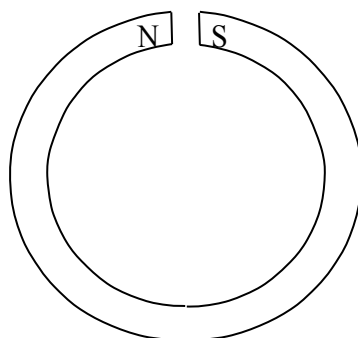


Рис. 2. Кольцеобразный постоянный магнит.

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

$$BS = B_{\text{зазора}} S_{\text{зазора}}, \quad (2)$$

где $B_{\text{зазора}}$ - индукция магнитного поля в зазоре, а $S_{\text{зазора}}$ - площадь поперечного сечения зазора. Если

$$S = S_{\text{зазора}}, \quad (3)$$

то

$$B = B_{\text{зазора}} \quad (4)$$

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.

Электромагнит. 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 электрический ток, то индукция внутри такого железного сердечника будет значительно больше, чем внутри обмотки без сердечника (как и при первоначальном намагничивании постоянных магнитов). Для сердечников электромагнитов используют магнитомягкие материалы, т. е с малой коэрцитивной силой H_c и малой остаточной магнитной индукцией B_r – это позволяет путем изменения силы электрического тока в обмотке изменять создаваемое магнитное поле почти от нуля до максимально возможного значения.

Индукция магнитного поля внутри сердечника

$$B = \mu \mu_0 H, \quad (5)$$

где μ - относительная магнитная проницаемость материала сердечника в поле H , созданном обмоткой с током.

Известно, что в ферромагнетике, помещенном в магнитное поле, возникает намагниченность J (рис. 3, а). При этом индукция в ферромагнетике выражается соотношением

$$B = \mu \mu_0 H = \mu_0 H + J, \quad (6)$$

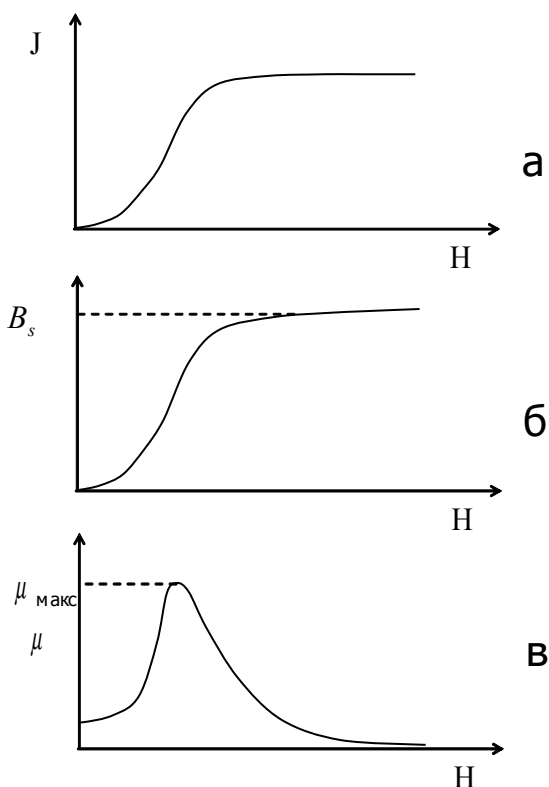


Рис. 3. Зависимость от внешнего магнитного поля намагниченности (а), магнитной индукции (б) и относительной магнитной проницаемости ферромагнетика (в);

что иллюстрируется рис. 3, б. Относительная магнитная проницаемость μ является функцией поля H (рис. 3, в). Для железа типа “армко”, из которого обычно делают сердечники электромагнитов, индукция насыщения $B_s = 1,5 \text{ Т}$, максимальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{макс}} = 4300$. В соответствии с (б) внутри замкнутого сердечника с обмоткой индукция в μ раз больше, чем в пустой обмотке при том же токе.

Если в сердечнике сделать узкий зазор, то индукция в нем будет незначительно отличаться от индукции в сердечник без зазора.

Расчет величины индукции магнитного поля в зазоре электромагнита. Рассмотрим электромагнит, устройство которого показано на рис. 4. Пусть длина сердечника l , ширина

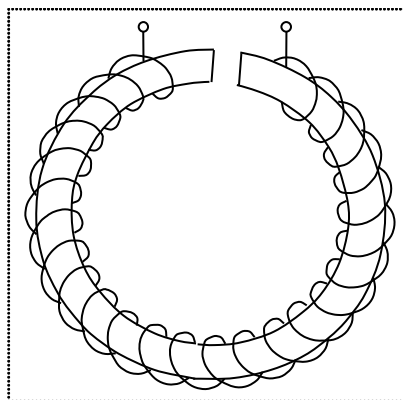


Рис. 4. Простой электромагнит с кольцевым сердечником.

зазора $l_{\text{зазора}}$, обмотка имеет N витков. Пусть по обмотке течет электрический ток силой I . Согласно теореме о циркуляции магнитного поля

$$NI = Hl + H_{\text{зазора}}l_{\text{зазора}} . \quad (7)$$

Здесь H – напряженность магнитного поля внутри сердечника, $H_{\text{зазора}}$ – напряженность поля в зазоре. Нас интересует индукция магнитного поля в зазоре $B_{\text{зазора}}$, которая связана с величиной $H_{\text{зазора}}$ соотношением

$$B_{\text{зазора}} = \mu_0 H_{\text{зазора}} . \quad (8)$$

Индукция в сердечнике

$$B = \mu \mu_0 H . \quad (9)$$

Соотношение (7) перепишем в виде:

$$NI = \frac{Bl}{\mu \mu_0} + \frac{B_{\text{зазора}}l_{\text{зазора}}}{\mu_0} . \quad (10)$$

Если рассеянием магнитного потока Φ можно пренебречь, то

$$\Phi = BS = B_{\text{зазора}}S_{\text{зазора}} , \quad (11)$$

где S и $S_{\text{зазора}}$ – площадь поперечного сечения сердечника и зазора соответственно. В случае

$$S = S_{\text{зазора}} \quad (12)$$

будет и

$$B = B_{\text{зазора}} . \quad (13)$$

Тогда

$$NI = \frac{B_{\text{зазора}}}{\mu_0} \left(\frac{l}{\mu} + l_{\text{зазора}} \right) , \quad (14)$$

откуда для интересующей нас величины $B_{\text{зазора}}$ получается:

$$B_{\text{зазора}} = \frac{\mu_0 NI}{\frac{l}{\mu} + l_{\text{зазора}}} . \quad (15)$$

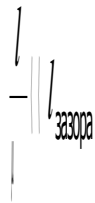
а) Случай $\frac{l}{\mu} \gg l_{\text{зазора}}$. Зазор настолько мал, а длина сердечника столь велика, что это соотношение выполняется, несмотря на то, что значение μ может достигать нескольких тысяч.

Пренебрегая в знаменателе правой части соотношения (15) вторым членом, имеем

$$B_{\text{зазора}} = \frac{\mu \mu_0 NI}{l} = \mu \mu_0 nI , \quad (16)$$

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

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

б) Случай . Из выражения (15) следует:

$$B_{\text{зазора}} = \frac{\mu_0 NI}{l_{\text{зазора}}}, \quad (17)$$

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

Замечание. Из выражений (16) и (17) 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 $H=nI$, а внутренним, которое меньше внешнего вследствие размагничивающего действия концов сердечника. Технический расчет электромагнита (сколько мотать витков N и какой пускать ток I ?) выполняется таким образом, что внутреннее магнитное поле, соответствующее максимуму магнитной проницаемости сердечника, достигается практически при разумных (минимально возможных) значениях произведения NI . Если это произведение делать еще больше, то проявится уменьшение величины μ как функции поля H (см. рис. 3, в).

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

Методы измерения индукции магнитного поля.

1. 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. 5, возникнет разность потенциалов U .

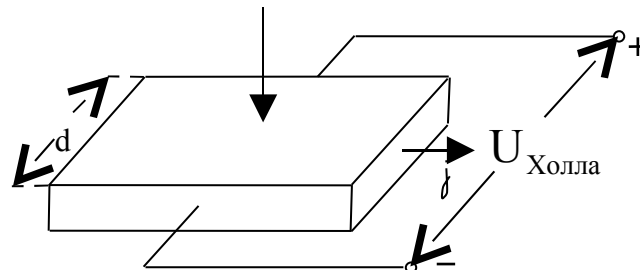


Рис. 5. К возникновению разности потенциалов Холла $U_{\text{Холла}}$ в образце, по которому течет электрический ток с плотностью j , когда образец находится под действием магнитного поля с индукцией \vec{B} .

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

$$U = R \cdot d \cdot j \cdot B, \quad (4)$$

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 (4) 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 .

2. Измерение магнитной индукции методом магнетрона.

В датчиках Холла используется отклонение магнитным полем заряженных частиц, движущихся в твердом теле. Для измерения магнитного поля можно использовать отклонение магнитным полем заряженных частиц, движущихся в вакууме.

Рассмотрим диод, конструкция которого изображена на рис.6.

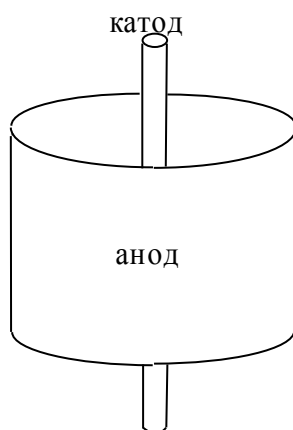


Рис. 6. Конструкция лампы, с помощью которой реализуется “метод магнетрона” измерения индукции магнитного поля.

Эта лампа имеет катод в виде прямой нити. Коаксиально с катодом расположен анод, имеющий форму цилиндра. Когда к аноду приложено положительное напряжение

относительно катода, электрическое поле в пространстве между катодом и анодом радиально, т. е. его силовые линии направлены вдоль радиусов системы электродов, и электроны, вылетевшие с катода, движутся к аноду по прямолинейным траекториям (рис. 7, а). Если теперь эту лампу поместить в магнитное поле, вектор индукции которого \vec{B} перпендикулярен силовым линиям электрического поля, то траектории электронов приобретут спиральный характер (рис. 7, б).

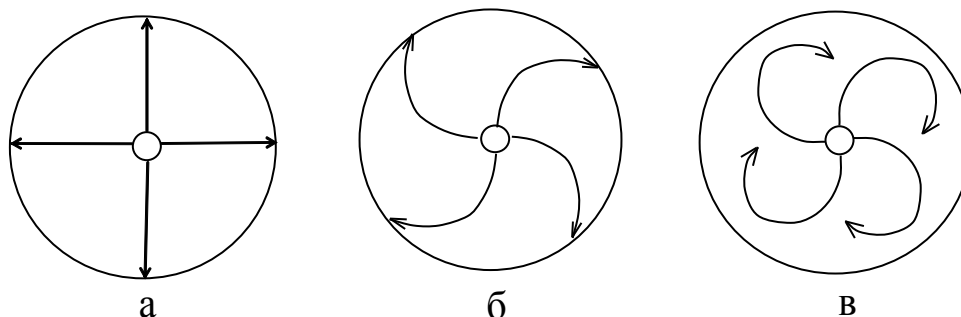


Рис. 7. Траектории движения электронов в пространстве между катодом и анодом лампы при различных напряженностях внешнего магнитного поля:

$$а - H \ll H_{\text{крит}}, \quad б - H = H_{\text{крит}}, \quad в - H \gg H_{\text{крит}}.$$

По мере увеличения индукции магнитного поля \vec{B} искривление траекторий будет все больше и больше, и, наконец, при некотором критическом значении индукции $B_{\text{крит}}$, искривление окажется столь сильным, что электроны не долетят до анода и анодный ток резко упадет (рис.7, в). Зная параметры конструкции диода, разность потенциалов между катодом и анодом, когда исчезает анодный ток, можно определить индукцию магнитного поля, в которое помещен диод.

Структура электрического и магнитного полей в описанном устройстве подобна структуре полей в радиолампе, являющейся генератором СВЧ колебаний и называемой магнетроном. Отсюда и метод измерения магнитной индукции, основанный на применении такой лампы, получил название «метода магнетрона». Он позволяет измерять поля, индукция которых более 0.02 Т, с точностью (1÷5)%.

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 $\vec{M}_я$. Природа магнитного момента любой частицы такова, что, будучи помещен в магнитное поле с индукцией \vec{B} , он прецессирует относительно этого поля (рис. 8, а) с частотой, называемой частотой Лармора:

$$\Omega = \gamma \cdot B. \quad (5)$$

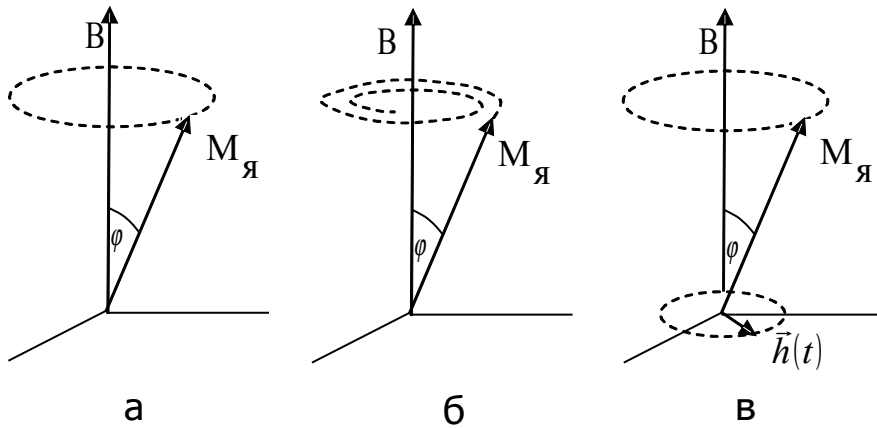


Рис. 8. а – свободная прецессия магнитного момента ядра $\vec{M}_{\text{я}}$ относительно вектора магнитной индукции \vec{B} ; б – затухающая прецессия вектора $\vec{M}_{\text{я}}$; в – прецессия вектора $\vec{M}_{\text{я}}$ при поддержке со стороны переменного поля $\vec{h}(t)$.

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

$$W = -M_{\text{я}} \cdot B \cos \theta \quad (6)$$

тратится на совершение работы против этих сил. В результате угол прецессии θ быстро уменьшается, а энергия прецессионного движения переходит в тепло (рис. 8, б). Эти потери энергии можно компенсировать, если на систему прецессирующих магнитных моментов наложить переменное магнитное поле $\vec{h}(t) = \vec{h}_0 \cos \omega t$ с круговой поляризацией (вектор \vec{h} вращается с частотой ω), перпендикулярное постоянному полю \vec{B} (рис. 8, в). При этом потери энергии прецессионного движения момента $M_{\text{я}}$ будут восполняться за счет энергии поля $\vec{h}(t)$ (в случае, если вращение вектора $\vec{h}(t)$ совпадает по фазе с прецессией вектора $\vec{M}_{\text{я}}$). При изменении частоты ω этого поля $\vec{h}(t)$ будет меняться эффективность подкачки энергии от него к прецессирующему моменту $\vec{M}_{\text{я}}$, и угол прецессии φ будет меняться при этом резонансным образом (рис. 9).

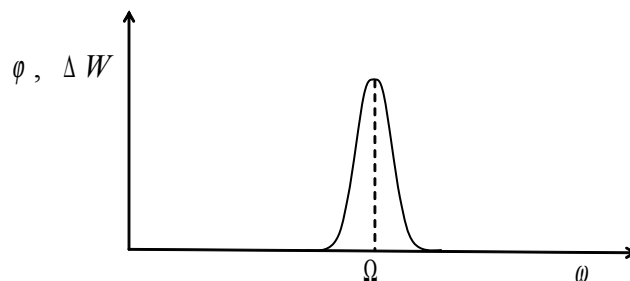


Рис. 9. Резонансная кривая прецессии магнитного момента при воздействии на него внешнего переменного поля частоты ω .

При совпадении частоты ω с ларморовской частотой Ω угол прецессии φ будет максимальным. Максимальным будет и отбор энергии ΔW от поля $\vec{h}(t)$. 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 Ω зависит от остроты резонансной кривой, изображенной на рис. 7. 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 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 γ , входящая в выражение (5), 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 \vec{B} определяется по формуле

$$B = \frac{\Omega}{\gamma} . \quad (7)$$

Метод ЯМР позволяет измерять поля, индукция которых составляет $0.02 \div 2,5T$ с точностью $0,01 \div 0,001\%$.

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 \vec{B} должен быть перпендикулярен плоскости датчика), а другой – для измерения поля в соленоиде или катушках Гельмгольца (вектор \vec{B} должен быть параллелен оси этого датчика). На задней стороне прибора есть специальный разъём, 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 определённой полярности. Полярность же ЭДС Холла зависит от ориентации датчика относительно вектора магнитной индукции \vec{B} измеряемого поля. Поэтому, когда, вращая ручки магазина сопротивлений, не удаётся скомпенсировать ЭДС Холла, следует поменять её 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 изменении магнитной индукции, превышающей 0.1 тесла.

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. 10, а).

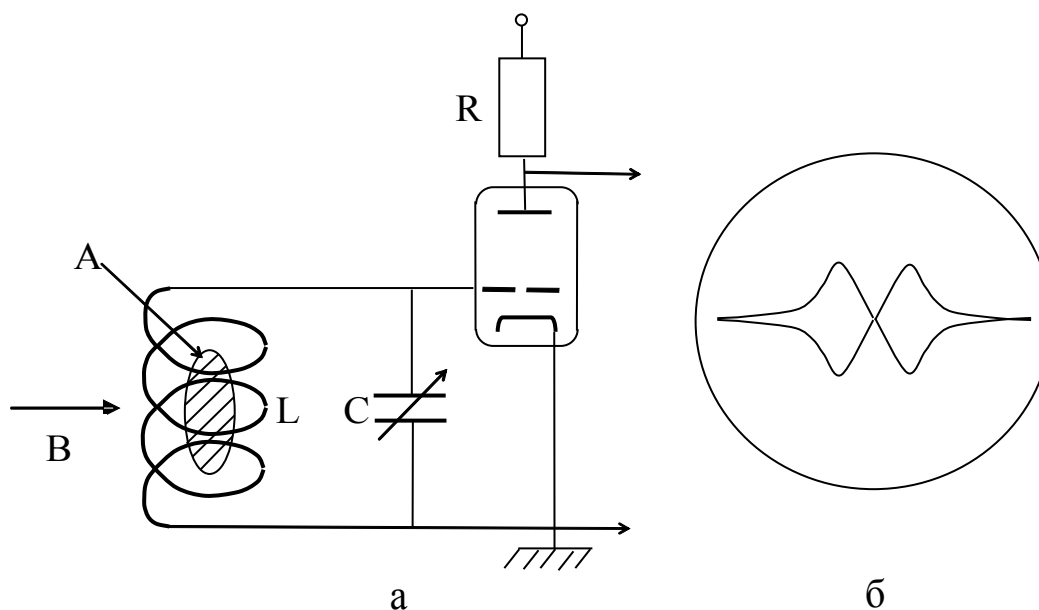


Рис.10. а – схема автодинного генератора; б – форма сигнала ЯМР, наблюдаемого на экране осциллографа.

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 C . 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. 10 не показана). Амплитуда модуляции в несколько раз превышает протяженность сигнала ЯМР по полю. Через эту катушку пропускается 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. 10, 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».

Плавное 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

$$B = \frac{1}{\gamma} \cdot f \quad (8)$$

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

(8) 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 «Время измерения». Переключатель «Время измерения» - в положении «10 mS». Время индикации отрегулировать с помощью соответствующей ручки таким образом, чтобы оно оказалось удобным для наблюдения.

Правила техники безопасности.

Прежде чем включить питание схемы, необходимо проверить правильность ее монтажа, правильность начальных положений различных регулировок, а также подготовиться к проведению измерений. Не превышать рекомендуемых значений тока. Не оставлять установку включенной без присмотра.

Включив установку, необходимо провести измерения, не отвлекаясь на другие дела.

Закончив измерения, выключить установку и разобрать схему.

Упражнение 1. Градуировка электромагнита с использованием прибора Ш1-8.

Подсоединить обмотку электромагнита к источнику питания в соответствии со схемой на рис. 11 (при этом секции обмотки соединены последовательно между собой и выходы источника - тоже последовательно между собой). Включить в сеть источник питания, измеритель Ш1-8. Увеличивая ток через электромагнит от нуля до $I = 0,7 \text{ А}$ через $0,05 \text{ А}$, для каждого значения тока измерить величину магнитной индукции в зазоре электромагнита.

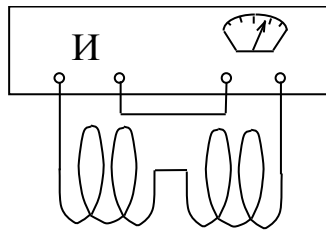


Рис. 11. Схема соединения секций обмотки электромагнита с источником питания “И”.

Замечание. При этом следует иметь в виду следующее. Для того, чтобы полученной градуировочной кривой электромагнита можно было пользоваться в последующих экспериментах с ним с максимально возможной точностью, следует и градуировочную кривую и последующие установки какого-либо магнитного поля в зазоре электромагнита производить одинаковым образом, а именно, увеличивая силу тока в электромагните от нуля в сторону его возрастания до максимального допустимого значения. При этом недопустима “подстройка” нужного значения силы тока путем его уменьшения. Дело в том, что, если напряженность магнитного поля H , создаваемого обмоткой, однозначно связана с силой тока I в ней (будучи прямо пропорциональной ей), то индукция B в сердечнике (и в зазоре) связана с напряженностью поля H неоднозначно: между ними связь гистерезисная (см. рис. 12).

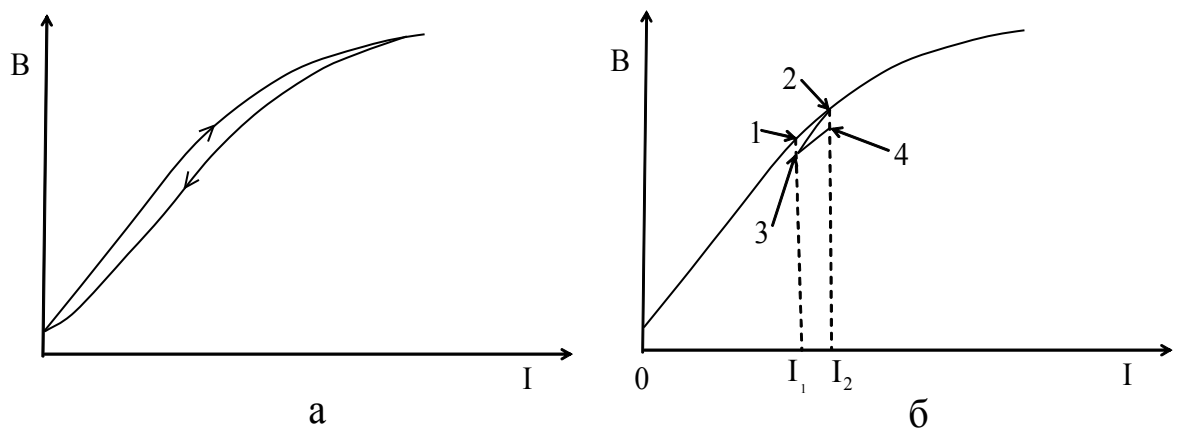


Рис. 12. а - Гистерезисная зависимость индукции магнитного поля B в сердечнике электромагнита от силы тока I в его обмотке; б – проявление гистерезисности зависимости $B(I)$ при подстройке силы ток в обмотке магнита.

Например, пусть нужно установить силу тока в электромагните, соответствующую точке 1, т. е. $I = I_1$. (см. рис. 10), а у нас получилась сила тока $I = I_2$, соответствующая точке 2. Если теперь силу тока уменьшить до $I = I_1$, индукция в зазоре электромагнита будет не $B = B_1$, а $B = B_3$. При дальнейшем увеличении сил тока до $I = I_2$ индукция будет не $B = B_2$, а $B = B_4$, и т.д.

Впрочем, эти тонкости имеет смысл учитывать, если нас интересует точность установки магнитного поля в зазоре электромагнита с точностью, лучшей примерно 5%.

В современных экспериментальных установках предусматривается автоматическое измерение индукции магнитного поля при любом значении силы тока в обмотке электромагнита (например, с помощью специального устройства, работающем на эффекте Холла).

Результаты измерений занести в таблицу вида

Таблица 1

I, А	0,05	0,10	0,15	0,70
B, Т							

Полученную зависимость $B(H)$ представить графически.

Упражнение 2. Градуировка электромагнита с использованием прибора Ш1-1.

Включить в сеть измеритель Ш1-1 и частотомер ЧЗ-44. Прогреть эти приборы в течение 10 минут. Установить силу тока через обмотку электромагнита $I=0,20$ А. Вращая ручку перестройки частоты на приборе Ш1-1, обнаружить сигнал ЯМР и произвести осчет частоты на приборе ЧЗ-44. Далее, как и в предыдущем упражнении, меняя силу тока I в электромагните с шагом 0,05 А, произвести измерения индукции магнитного поля B в зазоре электромагнита в пределах диапазона изменения частоты прибора Ш1-1. Результаты измерений занести в таблицу, как и в первом упражнении. Полученные точки (B, I) нанести на график $B(I)$, выполненный в первом упражнении.

Контрольные вопросы.

1. Что такое напряженность магнитного поля, индукция магнитного поля? В каких единицах они выражаются?
2. Что такое относительная магнитная проницаемость вещества?
3. Как зависит индукция магнитного поля в веществе с $\mu \gg 1$ от внешнего магнитного поля?
4. Что такое поток магнитной индукции, потокосцепление?
5. Как индукция в зазоре электромагнита зависит от величины зазора и относительной магнитной проницаемости сердечника?
6. В чем заключается эффект Холла?
7. В чем заключается «метод магнетрона» измерения магнитной индукции?
8. В чем заключается ЯМР?
9. Благодаря чему метод ЯМР измерения магнитной индукции имеет высокую точность?
10. Сравнить различные методы измерения магнитной индукции, имея в виду область измеряемых полей, точность измерения, условия измерения.

Литература.

С. Г. Калашников Электричество, М., 2004.