

Эффект Холла в Ni

§1.

Одним из наиболее интересных гальвано-магнитных явлений, как в смысле доступности его наблюдения, так и в смысле тех выводов, которые могут быть с помощью его сделаны, является эффект возникновения в проводнике с током, помещенном в магнитное поле, поперечной электродвижущей силы. Это явление, названное впоследствии эффектом Холла ¹, получило в рамках электронной теории следующее объяснение.

Представим себе металлическую пластинку (см. рис. № I), в которой течет ток I , в поперечном магнитном поле. $H = H_z$. Согласно электронной теории ток представляет собою поток заряженных частиц. Скорость их движения определяется формулой:

$$U_x = \frac{i_x}{n_0 e} = \frac{I}{n_0 e a b} \quad (1)$$

где i_x - плотность тока,

n_0 - число частиц в 1 м^2 .

Если $e < 0$, то U_x совпадает с направлением тока, если $e > 0$ - противоположна току. Как в том так и в другом случае сила, действующая на движущуюся частицу в магнитном поле $\vec{F} = e\mu[\vec{U}, \vec{H}]$ ², так

¹ Явление было впервые замечено в 1878 г. Физиком Холлом
² μ магнитная проницаемость.

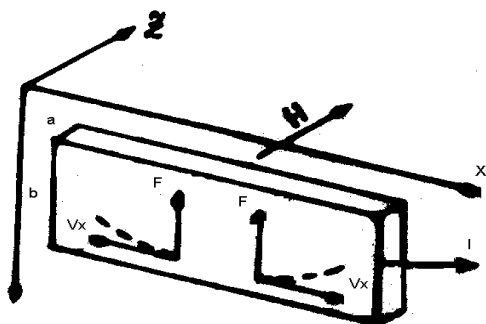


Рис. 1.

как переход от случая к случаю будет связан с изменением знака у двух множителей. В обоих случаях, следовательно, (рис. № I) движущаяся частица будет отклоняться в одну и ту же сторону, что приведет к обогащению подвижными частицами одной стороны и недостатку таковых на другой стороне. Так как частицы заряжены, то изменение их концентрации приведет к возникновению электродвижущей силы, которая будет расти с ростом концентрации. Электрическое поле, вызванное ЭДС, будет действовать на движущиеся частицы с силой $eE = \frac{\Delta V}{b}e$, направленной в противоположную, по сравнению с магнитной силой, сторону. Полная сила, действующая на частицу будет

$$F = e\mu UH - e\frac{\Delta V}{b}$$

где ΔU - разность потенциалов на краях пластинки.

Процесс концентрации подвижных частиц у края прекратится при условии:

$$F = eUH\mu - e\frac{\Delta V}{b} = 0$$

откуда ЭДС Холла $\Delta V = bUH\mu$ или в силу (1)

$$\Delta V = \frac{1}{en_0} \frac{IH\mu}{a} = K \frac{IH}{a} \mu \quad (2)$$

Выражение $K = \frac{1}{en_0}$, зависящее от свойств проводника, называется постоянной Холла. Величина k позволяет по ее знаку определять знак заряда частиц, а по величине - концентрацию подвижных частиц.

Изложенная теория не может претендовать на исчерпывающую полноту описания, как в смысле строгости рассуждений, так и в смысле справедливости исходных данных. Строгой теории эффекта Холла, основанной на волновой механике, до сих пор нет, хотя собранный к настоящему времени экспериментальный материал совершенно не укладывается в рамки существующей теории.

Целый ряд аномалий эффекта Холла, наблюдаемых в ферромагнетиках, как-то: зависимость от температуры, насыщения и другие, оказались согласованными с изложенной теорией в предположении, что в ферромагнетиках ЭДС Холла пропорциональна не B , а I - намагничению объекта. Замечательными работами Кикоина не только подтверждено предположение о пропорциональности ЭДС Холла намагничению, но и

объяснен целый ряд аномалий, наблюдаемых в ферромагнетиках. Таким образом для ферромагнетика вместо формулы (2) следует пользоваться формулой

$$\Delta V = E_x = K \frac{IJ}{a} \mu_0 \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная проницаемость вакуума.

§2.

Настоящая работа состоит из определения постоянной Холла для никеля и в экспериментальном доказательстве постоянства ее, если считать эффект пропорциональным намагничению.

Из формулы (3) следует, что для определения k

$$K = \frac{E_x a}{IJ \mu_0}$$

Необходимо:

- а) определить ЭДС (E_x) Холла,
- в) определить вызывающее E_x намагничение J ,
- е) измерить ток и толщину пластинки.

Для доказательства постоянства k - независимости его от величины J - следует проделать определение k для различных J , т.е. в различных магнитных полях.

(а) Так как значение ЭДС Холла при небольших полях и токах имеет порядок 10^{-7} в, т.е. лежит на

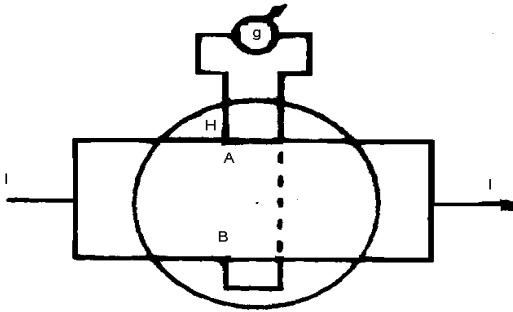


Рис. 2.

границе чувствительности имеющихся приборов, то ее измерения представляют собой основную задачу, требующую специального рассмотрения.

Простейшая схема, принципиально годная для измерения ЭДС Холла изображена на рис. № 2. В этой схеме к краям пластин (точки А и В), между которыми действует E_x , непосредственно подведен гальванометр. Так как сопротивление гальванометра R_g значительно больше сопротивления участка АВ пластинки, можно считать, что вся ЭДС Холла будет приложена к гальванометру, так что необходимость в специальных компенсационных схемах отпадает.

Однако эта схема неприемлема, так как практически невозможно сделать отводы А и В от краев пластинки так, чтобы точки А и В попали на одну эквипотенциальную линию. При минимальной несимметрии отводов и значительном токе I разность потенциалов,

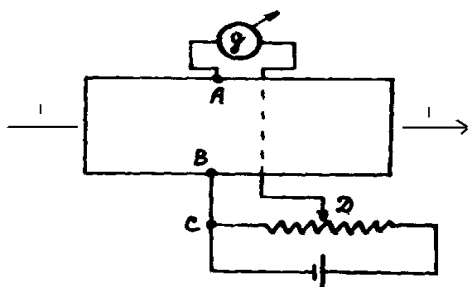


Рис. 3.

или, как мы будем ее в дальнейшем называть, ЭДС несимметрии будет того же порядка, что и ЭДС Холла, и даже больше. Поэтому для измерения ЭДС Холла следует в схему ввести компенсационное устройство, с помощью которого можно было бы скомпенсировать ЭДС несимметрии.

Развитая в этом направлении схема изображена на рис. № 3. ЭДС несимметрии в этой схеме может быть скомпенсирована частью ЭДС постоянного источника, снимаемой с переменного участка CD. Эта схема однако требует стабильности основного тока I , так как установленная компенсация имеет силу только для одного значения тока и требует повторной компенсации при изменении последнего. Более удобны в этом отношении так называемые автокомпенсационные схемы. В них необходимая для компенсации ЭДС снимается с цепи основного тока.

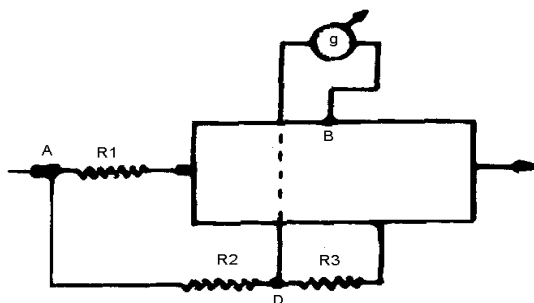


Рис. 4.

Одна из возможных автокомпенсирующих схем изображена на рис. 4. Если точки А, В и С выбраны так, что $V_a > V_b > V_c$, то меняя сопротивление r_2 и r_3 , можно всегда добиться, чтобы

$$V_d = V_b$$

тогда включение гальванометра в точки В и D эквивалентно исключению ЭДС несимметрии.

Такая компенсационная схема удобна для измерения ЭДС Холла, однако применительно к нашей задаче и задаче определения ЭДС Холла в никеле она неприемлема по следующим причинам. Сопротивление никеля сильно зависит от того, находится ли он в магнитном поле или нет. Если никель находится в магнитном поле, то его сопротивление меняется с изменением поля. Представим себе теперь, что в условиях отсутствия поля была достигнута компенсация, т.е. ЭДС

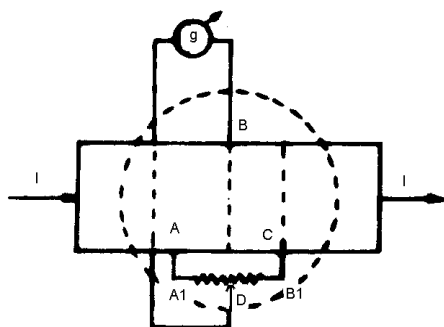


Рис. 5.

несимметрии, равная падению напряжения основной цепи от В до С оказалась скомпенсированной, тогда при включении магнитного поля, компенсация неизбежно нарушится, так как изменится сопротивление участка ВС и связанная с ним ЭДС несимметрии.

Задача измерения ЭДС Холла для никеля может быть решена таким измерением последней схемы, при котором сопротивление r , (согласно рис. № 4) будет меняться пропорционально сопротивлению участка ВС. Это может быть осуществлено переносом точки А на пластину. Рисунок № 5 изображает подробный процесс.

На рабочей пластине делается три отвода А, В и С, как показано на рис. 5. Точки А и С соединены с реохордом. Точки отводов выбираются так, что $V_a > V_b > V_c$, поэтому на реохорде всегда существует точка D, удовлетворяющая условию компенсации

$V_d = V_b$. Последнее очевидно эквивалентно условию $\frac{r_{ab}}{r_{bc}} = \frac{r_{a_1d}}{r_{db_1}}$, выполнение которого экспериментально достигается передвиганием контакта D на реохорде. Если рабочая часть пластинки (участок AC) помещается в однородное магнитное поле, то сопротивление участков АВ и ВС меняется одинаковым образом и, следовательно, компенсация не нарушается. Схема, изображенная на рис. № 5, используется в данной работе. (Никелевая пластина толщиной 0,005 см зажата между двумя листами плексигласа. Концы отводов подведены к клеммам, укрепленным на той же плексигласовой оправе. Оправа шарнирно скреплена с кожухом электромагнита. Имеющаяся свобода крепления обеспечивает возможность перемещения никелевой пластинки между полюсами электромагнита в любом направлении и закрепления в любом положении.). Монтажная схема приборов, необходимых для измерения ЭДС Холла, изображена на рис. 6.

Собрав схему, изображенную на рис. № 6, следует приступить к измерениям в следующем порядке. При разомкнутом ключе цепи гальванометра (ключ K_2) замыкают цепь пластинки ³(ключ K_3), Изменяя сопротивление реостата R_2 , устанавливают ток по амперметру A_2 около 1 А. Наблюдая за показаниями

³Так как только три точки (А, В и С) цепи пластинки должны быть соединены с цепью гальванометра, необходимо позаботиться об отсутствии проводимости между другими точками этой цепи и цепью гальванометра. Все элементы цепи пластинки установлены на изоляторах. Важно, чтобы соединяющие провода в цепи гальванометра были хорошо изолированы.

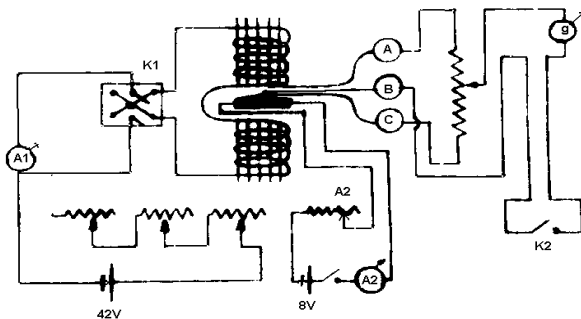


Рис. 6.

гальванометра, включают на мгновение ключ K_2 . Если при этом отброс будет велик, уменьшают ток через пластинку до такой величины, при которой включение цепи гальванометра не приводит к большим токам в цепи гальванометра. Замкнув K_2 , приступают к компенсации.

Если необходимо значительно переместить ползун на реохорде, следует оттянуть пружину, передвинуть ползун карандашом, так как продолжительное скольжение приводит к нагреву и появлению вредных термопар. После достижения компенсации постепенно увеличивают ток через пластину, уточняя положение компенсации. Ток через пластину следует поднять до 10 А. Так как в процессе компенсации могли развиться значительные термо-ЭДС, следует разомкнуть K_3 и убедиться, что показания гальванометра не изменились. В противном случае это означает, что в цепи

гальванометра появились термо-ЭДС. Тогда необходимо подождать, пока температура выровняется. После этого, включив вновь ключ, необходимо уточнить компенсацию.

Добиваться полной компенсации однако не стоит, так как всякое смещение реохорда вызывает нагрев.

Разницу в показаниях гальванометра при включении или выключении ключа K_3 в 1 см шкалы можно считать допустимым, так как неоднородность магнитного поля, о которой будет сказано ниже, неизбежно приведет к декомпенсации такого порядка и следовательно неизбежно потребует специальных мер учета и исключения связанной с ней ошибки.

Выполнив компенсацию, следует перейти к измерению ЭДС Холла при различных токах в электромагните. Рекомендуем провести измерения ЭДС при следующих токах: 2, 3, 4, 5, 6 и 7 ампер. Изменение тока осуществляется с помощью реостатов, выводить которые следует в определенном порядке, учитывая максимально допустимые для них токи. Выключение тока электромагнита, его регулировку и переключение необходимо производить при разомкнутой цепи гальванометра (ключ K_2), т.к. поток магнита, замыкаясь не только через сердечник, но и по всему пространству может создать значительные импульсы тока в цепи гальванометра и чрезмерно раскачать его подвижную систему, если в этот момент цепь гальванометра будет замкнута. Ключ K_2 замыкается после того как в цепи магнита будет установлена нужная сила тока. Наблюдаемое в этих условиях показание галь-

ванометра нельзя однако считать пропорциональным ЭДС Холла, так как из-за неоднородности магнитного поля компенсация могла нарушиться, и в цепи гальванометра вместе с ЭДС Холла будет действовать ЭДС нескомпенсированной несимметрии. Как известно, в местах неоднородности магнитного поля имеет место искривление магнитных линий, известное под названием бочковидности. Это обстоятельство приводит к тому, что пластинка пересекается магнитными линиями под разными углами в различных местах. (обстоятельство для никеля чрезвычайно важное!). Продольная и перпендикулярная составляющие магнитного поля по отношению к току оказывает различное влияние на сопротивление. Если перпендикулярная составляющая увеличивает сопротивление, то продольная уменьшает и уменьшает чрезвычайно сильно.

Все это говорит о том, что коль скоро участок АВС пластинки попал в место неоднородности, можно ожидать декомпенсации не только за счет численного изменения величины поля при переходе от участка АВ к участку ВС, но и главным образом за счет различия продольных составляющих.

Отклонение гальванометра поэтому пропорционально сумме или разности ЭДС, о которых говорилось выше. Если теперь включить K_2 , изменить направление тока в электромагните и вновь включить K_2 , то гальванометр отклонится в другую сторону. Отклонение, вообще говоря, будет по величине другим, т.к. ЭДС Холла изменит знак, а знак нескомпенсированной ЭДС несимметрии останется тот же. Потому при

одном направлении магнитного поля будет пропорционально сумме, а при другом - разности ЭДС. Беря полуразность этих отбросов с учетом знаков, можно освободиться от ЭДС несимметрии и получить ЭДС Холла в чистом виде. Так было бы, если бы измерялся угол отклонения. Так как предполагается измерение отклонения гальванометра проводить с помощью трубы и шкалы, где по существу измеряется тангенс, такой метод исключения ЭДС несимметрии приведет к некоторым ошибкам. Ради уменьшения их следует, смещая пластинку вдоль зазора, найти область однородного поля, при котором отклонения гальванометра для прямого и обратного направления поля будут примерно одинаковыми (расхождение порядка 1 см). Найдя такое положение пластинки, необходимо для каждого тока в электромагните промерить отклонение вправо и влево и найти полусумму их абсолютных значений. Так как в силу ряда не поддающихся учету причин (типа малых деформаций пластинки в магнитном поле) повторные измерения дают значительный разброс, определение отклонений следует произвести раз 10 и за окончательный результат взять среднее. Следует отметить, что последовательность указанных измерений необходимо вести с перерывами. После измерений, связанных с одной силой тока через магнит, необходимо включить как обмотку электромагнита, так и ток в пластине минут на 5. Это необходимо для охлаждения частей, нагревание которых приводит к возникновению термо-ЭДС.

Задача определения намагничивания, имеющего ме-

сто в никеле распадается на две части.

1. Определение внешнего поля, в котором находится никелевая пластина - поля в зазоре электромагнита и

2. Определение магнитных свойств никеля.

Первая задача решается с помощью баллистической схемы, в цепи которой имеется виток определенной площади, вводимый в зазор электромагнита. Виток вмонтирован в плексигласовую оправу пластинки. Концы его поджаты под клеммы. Диаметр витка = 39 мм. При изменении магнитного поля от B до $-B$ магнитный поток через виток изменится на $\Delta\Phi = 2BS$, где S - площадь витка. Через гальванометр протекает заряд $\Delta Q = \frac{\Delta\Phi}{R}$, где R - сопротивление цепи гальванометра, и гальванометр дает отброс α , связанный с ΔQ соотношением $\Delta Q = C_b\alpha$, где C_b - баллистическая постоянная.

1) Чувствительность гальванометра $0,59 \cdot 10^{-9}$ а/мм/м.

2) Сопротивление его 2035 ом.

Так как $\Delta Q = \frac{\Delta\Phi}{R} = C_b\alpha$, то

$$\Delta\Phi = 2BS = C_b\alpha R$$

откуда

$$B = \frac{C_b R}{2S} \alpha \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), для описания B необходимо знать произведение $C_b R$. Определение последнего производится с помощью эталона взаимной индукции, включаемого в цепь гальванометра своей вторичной катушкой. Действительно, меняя в первичной об-

мотке эталона направление тока, мы изменяем поток во вторичной обмотке на $\delta\Phi = M2I = RC_b\beta$, где β - отброс при переключении тока в эталоне, M - коэффициент взаимной индукции, а RC_b - искомое произведение. Из этого отношения определяем RC_b в виде

$$RC_b = \frac{2MI}{\beta} \quad (5)$$

Общая схема приборов изображена на рис.7. Собрав левую часть, следует выполнить вначале измерение индукции поля в зазоре электромагнита, а затем, собрав правую часть схемы, выполнить градуировку баллистической схемы, т.е. проделать операции с эталоном взаимной индукции. Коэффициент взаимной индукции нашего эталона равен

$$M = 8 \cdot 10^{-3} \quad (\text{генри}) , \text{ а}$$

прочие постоянные схемы таковы, что в первичной обмотке следует создать ток не больше 0,04 а. Для измерения этого тока следует воспользоваться миллиамперметром, предусмотренным для этой цепи. Определив β и I , вычисляют RC_b и переходят к определению магнитного поля, сводящемуся к измерению α . α промеряют для каждого тока в электромагните.

Так как силовые линии магнита замыкаются через все пространство, то изменение поля в магните может изменить поток не только через виток S , но и через виток обмотки эталона. Это обстоятельство затрудняет измерение поля в зазоре, благодаря чему рекомендуется после измерения $C_bR(\beta)$ обмотку эталона из цепи гальванометра исключить. Чтобы не менялось при

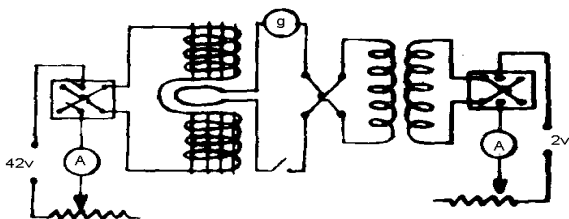


Рис. 7.

этом сопротивление цепи гальванометра, рекомендуется ввести эквивалентное сопротивление, укрепленное между правой клеммой гальванометра и добавочной клеммой.

Определив индукцию, создаваемую магнитом для тех токов, для которых были измерены ЭДС Холла, следует перейти к вычислению намагничения. Известно, что намагниченные $J = \frac{B}{\mu_0} - H^*$, где B и H суть индукция и напряженность магнитного поля внутри никеля. Известно также, что нормальная составляющая B непрерывна, а так как поле нормально пластинке, то индукция, измеренная в воздухе, будет одновременно и индукцией в никеле.

Для определения напряженности в никеле следует изучить его магнитные свойства - снять зависимость B от H . Для этого имеется никелевый тороид, выполненный из того же никеля, что и пластинка. На то-

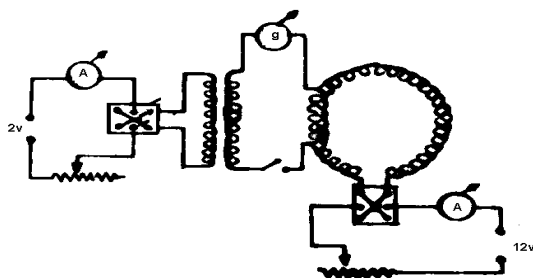


Рис. 8.

роиде сделаны 2 обмотки: первичная, создающая H и вторичная, включаемая в цепь баллистического гальванометра для измерения B . Собирается схема, изображенная на рис. № 8.

Аналогично предыдущему определяется с помощью эталона произведение $C'_B R'$, которое теперь будет иным, из-за иного сопротивления цепи. Измерив $C'_b R'$, переходят к работе с тороидом. Для того, чтобы перейти на прямолинейный участок кривой $B = B(H)$, следует ток в тороиде увеличить до 6 ампер, поднимая его скачками и измеряя отбросы через каждый ампер. Так как при токе через первичную обмотку тороида порядка 4 А и более обмотка сильно нагревается, то следует измерения в этой области токов производить максимально быстро с перерывами для охлаждения тороида! Никогда не оставлять ток в обмотке длительно включенным !! Для того, чтобы не

сказывалось предварительное намагничение, следует перед каждым измерением переключать ток в тороиде раз 10-15. Измерив α и I , мы получаем возможность вычислить H и B по формулам

$$H = \frac{IN_1}{2\pi\rho} = \frac{IN_1}{2\pi\rho} \quad \text{и} \quad B = \frac{C'_B R'}{2SN_2} \alpha \quad (6)$$

здесь I - ток в первичной обмотке; N_1 и N_2 - число витков в первичной и вторичной катушке; S - площадь поперечного сечения тороида, а ρ - средний радиус тороида. Применительно к нашему тороиду $N_1 = 200$; $N_2 = 5$; $S = 0,9\text{см}^2$ и $\rho = 2,5\text{см}$.

Вычислив по формуле (6) B и H следует построить график $B = B(H)$ и, если построенной кривой не хватит для отыскания H , соответствующих тем значениям B , которые имели место при определении ЭДС Холла, следует продолжить (экстраполяцией) прямолинейный участок кривой и область больших значений H и B .

График позволит определить те H , которые имели место в никеле при измерении ЭДС Холла.

После определения B и H намагничение вычисляется по формуле:

$$J = \frac{B}{\mu_0} - H$$

Имея в виду, что толщина пластинки $a = 0,005$ см коэффициент Холла вычисляется по формуле:

$$K = \frac{E_x a}{IJ\mu_0} \quad (7)$$

формула (7) дает нам K в единицах СИ.

Примечание: В схемах, изображенных на рис. 7 и 8, предусмотрено самостоятельное питание первичной обмотки эталона, с одной стороны, и обмоток либо магнита, либо тороида с другой стороны. В нашей работе и то и другое питание обеспечивается одним щитом, на который подается с распределительного щита либо 2 V, либо 18 V, либо 42 V. Операции, связанные с питанием левой и правой части схемы, выполняются последовательно.

Литература

1. Беккер - Электронная теория.
2. Дорфман и Кикоин - Физика металлов.

Задание

Найти наилучшее положение образца в межполюсном пространстве электромагнита, после чего измерить постоянную Холла для различных значений намагниченности. Последнее включает в себя:

1. Определение ЭДС Холла при выбранном токе через пластинку при различных значениях приложенного магнитного поля.

2. Измерение индукции поля в зазоре электромагнита, соответствующей всем тем случаям, в которых была измерена ЭДС Холла. Пункт включает в себе наблюдение баллистических отбросов вследствие наведения ЭДС индукции в витке с известной площадью, помещенном в переключаемое поле, и определение баллистической постоянной схемы.

3. Определение напряженности магнитного поля внутри никелевой пластинки в зависимости от различных задаваемых значений индукции по прилагаемому графику и определение намагниченности.

4. По результатам предыдущих пунктов вычисляется намагниченность никеля и коэффициент Холла для него при всех примененных в опытах с явлением Холла магнитных полях.

Требования, предъявляемые к отчету

По пункту I

Дать электрическую схему, с которой определялась ЭДС Холла. Привести таблицу отношений (в обе стороны - в соответствии с тем или иным направлением магнитного поля) при выбранном токе через пластинку и различных магнитных полях, характеризующихся, пока что, силой тока, питающего магнит. Далее в таблице привести отклонения, отвечающие чистому действию ЭДС Холла и вычисленные значения этой ЭДС. Для пояснения таблицы привести формулу для

вычисления этой ЭДС. и дать примерный расчет по ней.

По пункту 2

Привести формулу для вычисления баллистической постоянной схемы, привести экспериментальные величины и, поставив их в формулу, найти величину баллистической постоянной.

Дать таблицу баллистических отбросов при переключении магнитного поля и вычисленных значений индукции B . Вычисления проиллюстрировать примером.

Поскольку график индукции поля B в никеле в зависимости от напряженности поля H прилагается, необходимо лишь привести величину напряженности магнитного поля и намагниченность внутри никелевой пластинки.

По пункту 4

Указать расчетную формулу для вычисления коэффициента Холла с объяснением входящих в нее величин, показать примерный расчет по ней и привести таблицу коэффициентов Холла, получившихся при разных значениях J .

Найти окончательный результат и среднюю квадратичную погрешность его.