

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М.В. ЛОМОНОСОВА

*Физический факультет*

# **Магнитострикция ферромагнетиков**

*Спецпрактикум кафедры магнетизма*

Москва 2010

Составитель: снс С.А. Грановский

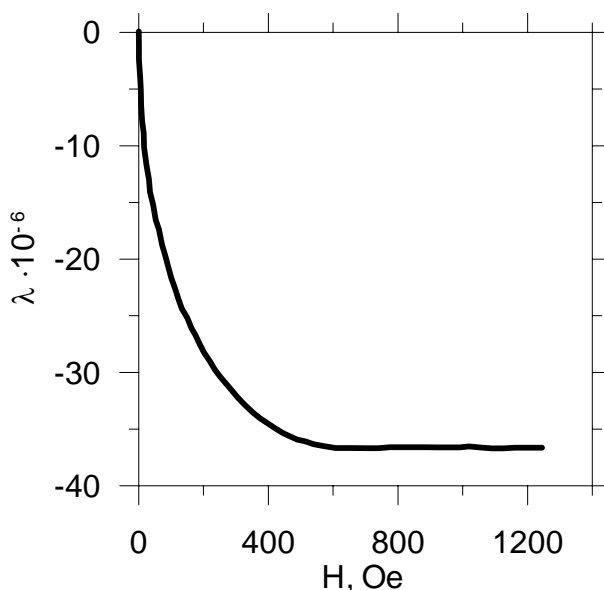
При помощи проволочных тензометров на образцах в форме диска измеряется продольная и поперечная магнитострикция насыщения ферромагнетиков. На образцах в форме стержня определяется зависимость магнитострикции от намагниченности.

---

Явление самопроизвольной деформации кристалла при изменении магнитного порядка или ориентации вектора намагниченности было открыто Джоулем в 1842 г. и носит название магнитострикции.

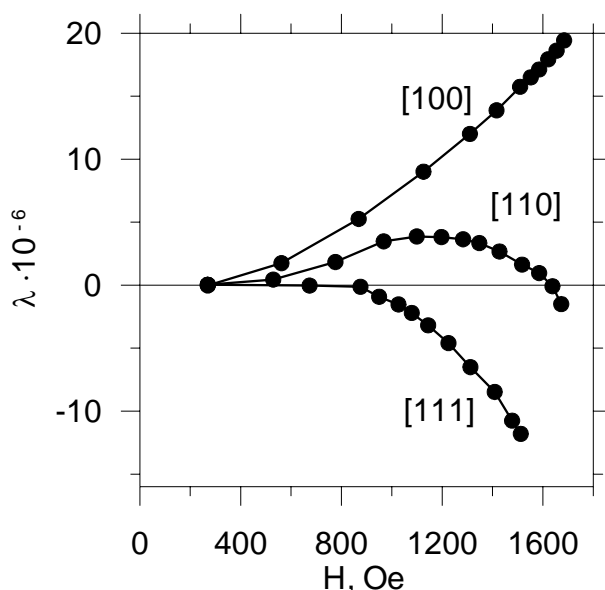
В отличие от пара и диамагнитных тел в ферромагнетиках магнитострикционные явления имеют ряд качественных особенностей, обусловленных наличием у последних спонтанной намагниченности. На рис.1 в качестве примера дана зависимость линейной магнитострикции  $\lambda$  ( $\lambda = \frac{\Delta l}{l}$  относительное изменение длины) поликристаллического никеля от напряженности магнитного поля  $H$ . Как видно, магнитострикция никеля уже в сравнительно слабых магнитных полях достигает некоторого предельного значения (насыщения) и затем мало меняется при дальнейшем увеличении напряженности поля  $H$ . Это обстоятельство указывает на то, что магнитострикция ферромагнетиков зависит не от  $H$ , а от намагниченности  $J$ . Величину магнитострикции при техническом насыщении называют магнитострикцией насыщения  $\lambda_s$  и обычно принимают в качестве основной характеристики магнитострикционных свойств ферромагнетиков.

При комнатной температуре магнитострикция насыщения поликристаллического никеля равна  $-35 \cdot 10^{-6}$ , для поликристаллов железа и кобальта соответственно  $8 \cdot 10^{-6}$  и  $-50 \cdot 10^{-6}$ . С повышением температуры магнитострикция, как правило, уменьшается обращаясь практически в нуль в точке Кюри.



**Рис.1.** Зависимость линейной магнитострикции поликристалла никеля от напряженности магнитного поля.

Как показывают экспериментальные исследования, магнитострикция ферромагнитных кристаллов обладает резко выраженной анизотропией. На рис.2. приведена зависимость магнитострикции от намагниченности для монокристалла железа по основным кристаллографическим направлениям. Как видно, величина магнитострикции насыщения, как и сам ход  $\lambda(J)$  для разных кристаллографических направлений оказываются совершенно различными: магнитострикция положительна вдоль оси (100) и отрицательна по оси (111). В случае кристалла никеля знак магнитострикции по разным кристаллическим направлениям не меняется ( $\lambda < 0$ ). Однако, абсолютная величина магнитострикции насыщения различна: для оси (100)  $\lambda_s = -52 \cdot 10^{-6}$ , для оси (111)  $\lambda_s = -27 \cdot 10^{-6}$ . Качественно та же картина анизотропии магнитострикции наблюдается на кристаллах ферромагнитных сплавов. В ряде случаев на образцах редкоземельных элементов и их сплавов наблюдается гигантская магнитострикция  $10^{-3}$ , т.е. на два порядка больше, чем в металлах группы железа.



**Рис.2.** Полевые зависимости магнитострикции монокристалла железа.

Явление магнитострикции находит широкое применение в технике (магнитострикционные стабилизаторы частоты, магнитострикционные приемники и передатчики ультразвука итд) и кроме того играет важную роль при выяснении механизма процессов намагничивания ферромагнетиков и при изыскании новых магнитных сплавов.

Общее описание магнитострикционного эффекта содержится непосредственно в основных термодинамических уравнениях. Если, в качестве независимых переменных, характеризующих состояние магнетика, выбрать температуру  $T$ , давление  $P$ , и напряженность поля  $H$ , то уравнение термодинамики в дифференциальной форме представляется в следующем виде:

$$\delta\Phi = -S\delta T + V\delta P - J\delta H \quad (1)$$

где  $\Phi$  - термодинамический потенциал,  $V$  - объем,  $S$  - энтропия,  $J$  - намагниченность.

Отсюда непосредственно получается следующее равенство:

$$\left(\frac{\delta J}{\delta P}\right)_{H,S} = -\left(\frac{\delta V}{\delta H}\right)_{P,S} \cdot \left(\frac{\delta J}{\delta \sigma}\right)_{H,S} = \left(\frac{\delta l}{\delta H}\right)_{P,S} \quad (2)$$

Эти равенства указывают на то, что изменение намагниченности под действием всестороннего давления (или напряжения  $\sigma$ ), связано с изменением объема (или линейных размеров  $l$ ) магнетика при действии магнитного поля.

Различают следующие источники магнитострикции:

- 1) Обменная магнитострикция, обусловленная изменением энергии обменного взаимодействия. Она особенно велика в области точки Кюри и может носить как изотропный так и анизотропный характер.
- 2) Магнитострикция, вызванная изменением энергии диполь-дипольного взаимодействия. Эта магнитострикция анизотропна, но в большинстве случаев мала по величине.
- 3) Одноионная магнитострикция, связанная с влиянием анизотропного внутрикристаллического (электрического) поля на магнитный атом. Последний механизм является доминирующим источником магнитострикции в магнитоупорядоченных веществах.

Н.С. Акулов впервые, исходя из классического расчета магнитного взаимодействия атомов в ферромагнитной решетке, выявил закон анизотропии магнитострикции для кристаллов кубической симметрии:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} = a_0 + a_1 \left( \alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \beta_3^2 - \frac{1}{3} \right) + 2a_2 (\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \beta_3 \beta_1) + \dots \quad (3)$$

где  $\alpha_{1,2,3}$ ,  $\beta_{1,2,3}$  - направляющие косинусы векторов  $J$  и направления измерения относительно ребер куба,  $a_0$  - аддитивная постоянная,  $a_1$  и  $a_2$  - константы анизотропии магнитострикции численно равные

$$a_1 = \frac{3}{2} (\lambda)_{100}, \quad a_2 = \frac{3}{2} (\lambda)_{111}.$$

Закон анизотропии Акулова позволяет рассчитать магнитострикцию по любому направлению в кристалле в области процессов вращения и насыщения. Более того, используя закон анизотропии, можно получить соотношения, позволяющие провести оценку величины магнитострикции насыщения поликристалла по известным значениям магнитострикционных констант  $a_1$  и  $a_2$ . Представим выражение (3) в полярных координатах и полагая  $\alpha_1 = \cos \theta$ ;  $\alpha_2 = \sin \theta \cdot \sin \varphi$ ;  $\alpha_3 = \sin \theta \cdot \cos \varphi$  ( $\theta$ ,  $\varphi$  - полярные углы), и определяя средние значения продольной магнитострикции насыщения  $\lambda_s$  поликристалла получим:

$$\lambda_s = \frac{1}{4\pi} \cdot \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \lambda_s \sin \theta \, d\theta \, d\varphi$$

$$\lambda_s = \frac{4}{15} a_1 + \frac{2}{5} a_2 = \frac{2}{5} \lambda_{(100)} + \frac{3}{5} \lambda_{(111)} \quad (4)$$

Соотношение (3) представляет собой выражение закона анизотропии с учетом лишь двух констант магнитострикции. В более общем случае, как это вытекает из соображений симметрии, закон анизотропии, например, для кристалла типа Ni имеет вид

$$\lambda_s = a_1 \left( \alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \beta_3^2 - \frac{1}{3} \right) + 2a_2 (\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \beta_3 \beta_1) +$$

$$+ a_3 \left( \alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2 - \frac{1}{3} \right) + a_4 \left( \alpha_1^4 \beta_1^2 + \alpha_2^4 \beta_2^2 + \alpha_3^4 \beta_3^2 + \frac{2}{3} s - \frac{1}{3} \right) \quad (5)$$

где  $a_{1,2,3,4}$  - константы магнитострикции,  $s = \alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2$ . Характерно, что в законе анизотропии, представленном в общем виде (5), имеются члены, не зависящие от  $\beta$ , т.е. от направления измерения. Таким образом, эти члены описывают объемные магнитострикционные эффекты в ферромагнетиках. Константой объемного магнитострикционного эффекта является константа  $a_3$ . Усредняя выражение (5) можно получить связь магнитострикции насыщения поликристалла с константами магнитострикции  $a$ . Такое усреднение дает

$$\lambda_s = A \cdot B \cdot \cos^2 \varphi = B \cdot \left( \cos^2 \varphi - \frac{1}{3} \right) \quad (6)$$

где  $\cos \varphi = \alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \beta_3^2$ ,  $\varphi$  - угол между вектором  $J$  и направлением измерения,

$$A = -\frac{1}{5} \cdot \left( \frac{2}{3} a_1 + a_2 + \frac{2}{5} a_3 + \frac{4}{7} a_4 + \frac{1}{7} a_5 \right)$$

$$B = \frac{1}{5} \cdot \left( 2a_1 + 3a_2 + 2a_3 + \frac{12}{7} a_4 + \frac{3}{7} a_5 \right)$$

При  $\varphi = 0$ , т.е. для продольной магнитострикции имеем

$$(\lambda_s)_{\parallel} = \frac{2}{5} \cdot \left( \frac{2}{3} a_1 + a_2 + \frac{4}{7} a_4 + \frac{1}{7} a_5 \right) + \frac{4}{15} a_3 \quad (7)$$

при  $\varphi = \pi / 2$ , т.е. для поперечной магнитострикции

$$(\lambda_s)_{\perp} = -\frac{1}{5} \cdot \left( \frac{2}{3} a_1 + a_2 + \frac{4}{7} a_4 + \frac{1}{7} a_5 \right) - \frac{2}{15} a_3 \quad (8)$$

Из (7) и (8) следует, что если в ферромагнетике объемные магнитострикционные эффекты в области технического насыщения отсутствуют, т.е.  $a_3 = 0$ , то

$$(\lambda_s)_\perp = -\frac{1}{2} (\lambda_s)_\parallel \quad (9)$$

Другими словами, поперечная магнитострикция поликристалла при насыщении имеет противоположный знак относительно продольной и в два раза меньше последней. Однако, при наличии объемных магнитострикционных эффектов в области технического насыщения ( $a_3 \neq 0$ ) должно иметь место отступление от соотношения (9).

### Экспериментальные методы измерения магнитострикции.

Существует ряд методов, при помощи которых наблюдение явления магнитострикции возможно экспериментально. Данные методы можно разделить на дилатометрические, тензометрические и микроскопические.

Принцип дилатометрических методов состоит в том, что изменение геометрических размеров образца регистрируется при помощи т.н. дилатометрической ячейки различной конструкции. Регистрирующим элементом такой ячейки может являться емкость, в пространство между пластинами которой помещен исследуемый материал или электронно-механический преобразователь - механотрон.

Магнитострикцию возможно измерять тензометрическим методом. Деформация образца регистрируется тензометром (проволочным, полупроводниковым или пьезо- датчиком) прикрепленным к исследуемому образцу. Непосредственно измеряемой величиной является сопротивление в случае тензодатчика или заряд в случае пьезодатчика.

Кроме того, при помощи микроструктурных методов (дифракции рентгеновских лучей и нейтронов) можно непосредственно определять зависимость параметров кристаллической решетки от магнитного поля и/или температуры.

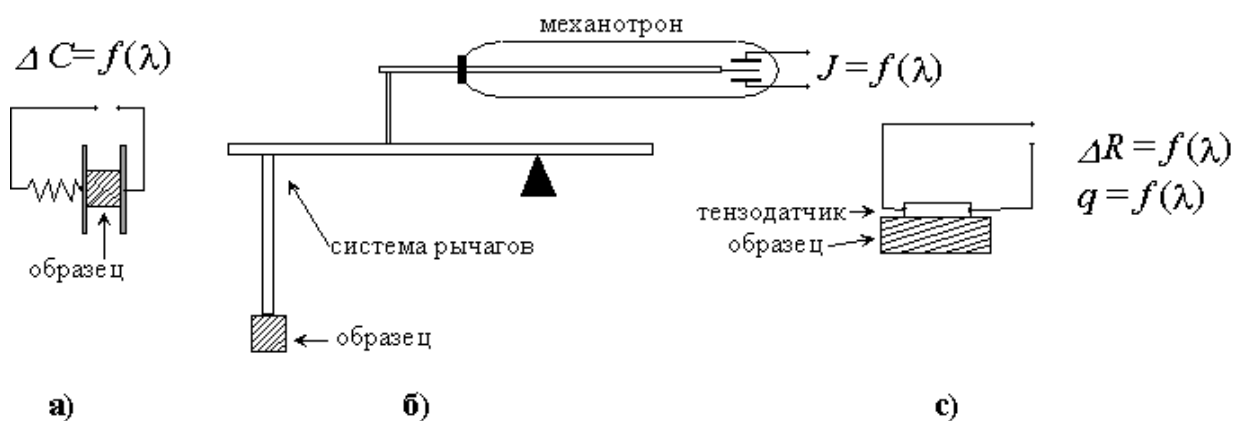


Рис.3. Принцип измерения магнитострикции дилатометрическим (а), (б) и тензометрическим методом (в).

## Упражнение 1

Определение угловой зависимости магнитострикции.

Цель данного упражнения состоит в определении зависимости магнитострикции насыщения поликристаллического образца от направления магнитного поля.

Блок-схема установки показана на рис.4. Ферромагнитный образец в форме тонкого диска наклеен на поворотном устройстве и помещен между полюсами электромагнита. Питание магнита осуществляется при помощи источника питания БП 1. В цепь питания магнита включены ключ К 1 и амперметр I, необходимый для контроля тока.

Поворотное устройство приводится в действие при помощи электромотора М, который подключен к блоку питания БП 3 через ключ К 4, коммутирующий ключ К 3 и систему концевых выключателей, автоматически останавливающих мотор в заданных позициях (начало и конец съемки). Поворотное устройство оснащено реохордом, сопротивление которого пропорционально углу поворота. Постоянное напряжение на концы реохорда подается с блока питания БП 2 (выход U), напряжение пропорциональное углу поворота поступает на вход 2 АЦП.

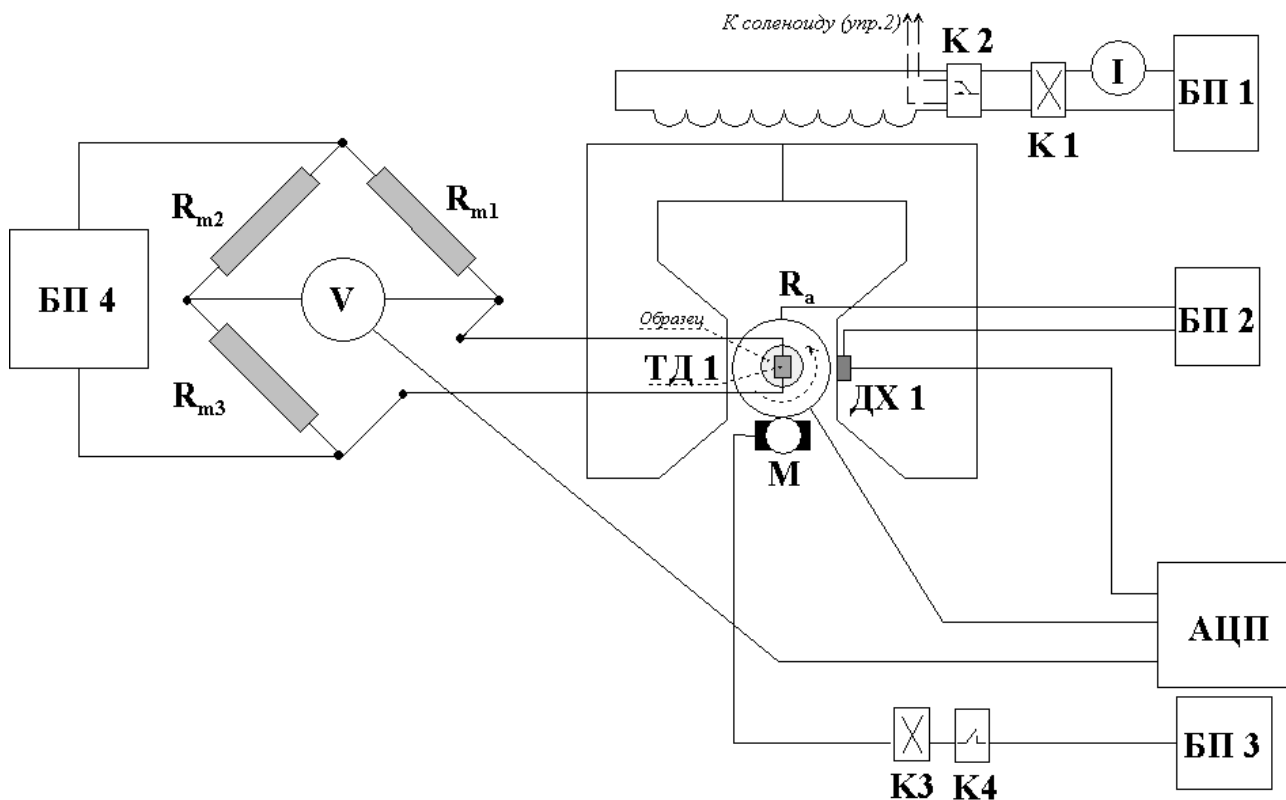
Для измерения магнитного поля используется датчик Холла ДХ 1, приклеенный в непосредственной близости к исследуемому образцу. Питание датчика осуществляется с блока питания БП 2 (выход I), э.д.с. Холла поступает на вход 4 АЦП.

Измерение магнитострикции производится тензометрическим методом. Проволочный датчик в виде плоской спирали из тонкой нихромовой проволоки диаметром 15-20 микрон наклеивается на поверхность исследуемого образца. Величина изменения омического сопротивления датчика пропорциональна магнитострикции образца:

$$\lambda = \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta R}{R} \quad (10)$$

Для применяемых в данной задаче тензометров  $\gamma = 2,0$  для упражнения 1,  $\gamma = 2,2$  для упражнения 2. Изменение сопротивления  $\Delta R$  тензодатчика измеряется по мостовой схеме. Блок питания БП 4 служит источником постоянного напряжения измерительного моста. Плечами мостовой схемы являются тензодатчик и три магазина сопротивлений  $R_{m1}$ ,  $R_{m2}$ ,  $R_{m3}$ . Ноль-индикатором служит нановольтметр В2-38. Аналоговый выход нановольтметра подключен через делитель напряжения к каналу 1 АЦП.





**Рис.4** Блок-схема установки для измерения угловой зависимости магнитострикции

Порядок работы.

- 1) Ключом К 2 подключить блок питания БП 1 к электромагниту (позиция “1”). Ключ К 1 при этом должен быть разомкнут, регулятор напряжения на блоке БП 1 должен находиться в положении 0.
- 2) Подключить тензодатчик ТД 1 к мостовой схеме.
- 3) Включить блок питания БП 4. Установить режим стабилизации напряжения 4.7 вольт. Записать в рабочую тетрадь напряжение  $U_m$ .
- 4) При помощи ключей К 3 и К 4 вывести поворотное устройство на угол 0.
- 5) Установить на магазинах сопротивлений значение, равное сопротивлению тензодатчика ТД 1.  $R_{t1} = 235.2$  Ом. Магазином сопротивлений  $R_{m1}$  добиться компенсации мостовой схемы. Записать в рабочую тетрадь сопротивления  $R_{m1}$   $R_{m2}$   $R_{m3}$  и напряжение раскомпенсации мостовой схемы  $U_R^0$ .
- 6) Перевести нановольтметр в режим “10 mV”, “РАЗРЕШ”.
- 7) Замкнуть ключ К 1. При помощи регулятора на блоке питания БП 1 подать на электромагнит ток 4 А. Записать значение тока в рабочую тетрадь и ввести ее в ЭВМ.
- 8) Перевести компьютерную программу в режим записи данных (кнопка “Старт”).
- 9) Включить электромотор поворотного устройства.
- 10) Записать значение  $U_R^0$  напряжения раскомпенсации мостовой схемы.

- 11) По достижении угла  $180^\circ$  выключить мотор поворотного устройства и выключить режим записи на ЭВМ (кнопка “Стоп”).
- 12) Записать значение напряжения раскомпенсации мостовой схемы  $U_R^{180}$ .
- 13) Перевести регулятор напряжения на блоке питания БП 1 в положение 0. Разомкнуть ключ К 1.
- 14) Записать текущее значение напряжения раскомпенсации мостовой схемы  $U_R^{180}(H=0)$  при нулевом поле.
- 15) Возвратить поворотное устройство в положение 0.
- 16) Сохранить полученные данные.

## Упражнение 2.

Определение зависимости магнитострикции от намагниченности.

Целью данного упражнения является определение зависимости магнитострикции от намагниченности. Образцом служит длинный цилиндрический стержень, который помещен в соленоид. На стержень по образующей наклеены проволочный тензометр ТД 2, аналогичный использованному в предыдущем упражнении. Кроме того, на стержень намотана катушка, служащая для измерения намагниченности баллистическим методом. Измерительная катушка подключена непосредственно к входу 3 АЦП. Для уменьшения влияния температурного дрейфа сопротивления тензодатчика ТД 2 на результат измерения магнитострикции в данном упражнении применена компенсационная мостовая схема, в которой одним из плеч измерительного моста служит дополнительный тензодатчик ТД 3 с омическим сопротивлением в отсутствие деформации равным (с точностью до 0,1 Ома) сопротивлению тензодатчика ТД 2. Тензодатчик ТД 3 наклеен на недеформируемый материал и помещен в непосредственной близости к датчику ТД 2. Изменение сопротивлений тензодатчиков ТД 2 и ТД 3, связанное с их нагревом, можно считать равными и оно, таким образом, не вызывает раскомпенсации мостовой схемы. Блок-схема установки показана на рис.5.

Принцип измерения намагниченности, использованный в данной задаче, состоит в том, что включении/выключении магнитного поля через катушку, имеющую  $N$  витков и сечение  $S$  протекает магнитный поток  $\Delta\Psi$ , пропорциональный индукции  $B$  исследуемого образца. Согласно закону электромагнитной индукции

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (11)$$

и через измерительную цепь омическим сопротивлением  $R$  будет течь индукционный ток

$$i_{\text{инд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{инд}}}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Psi}{dt} \quad (12)$$

По определению

$$i_{\text{инд}} = \frac{dq}{dt} \quad (13)$$

Подставив (12) в (13), получим

$$dq = -\frac{1}{R} d\Psi \quad (14)$$

Соответственно, через цепь катушка-измерительное устройство протечет заряд  $q$ , равный

$$q = -\frac{1}{R} \int d\Psi = -\frac{\Delta\Psi}{R} = -\frac{NSB}{R} \quad (15)$$

Определить  $q$  можно проинтегрировав непосредственно зарегистрированный импульс  $U(t)$ .

$$dq = \frac{U(t) dt}{R} \quad (16)$$

$$q = \frac{1}{R} \int U(t) dt \quad (17)$$

Таким образом индукция исследуемого образца равна

$$B = -\frac{1}{NS} \int_0^{t_{\text{изм}}} U(t) dt \quad (18)$$

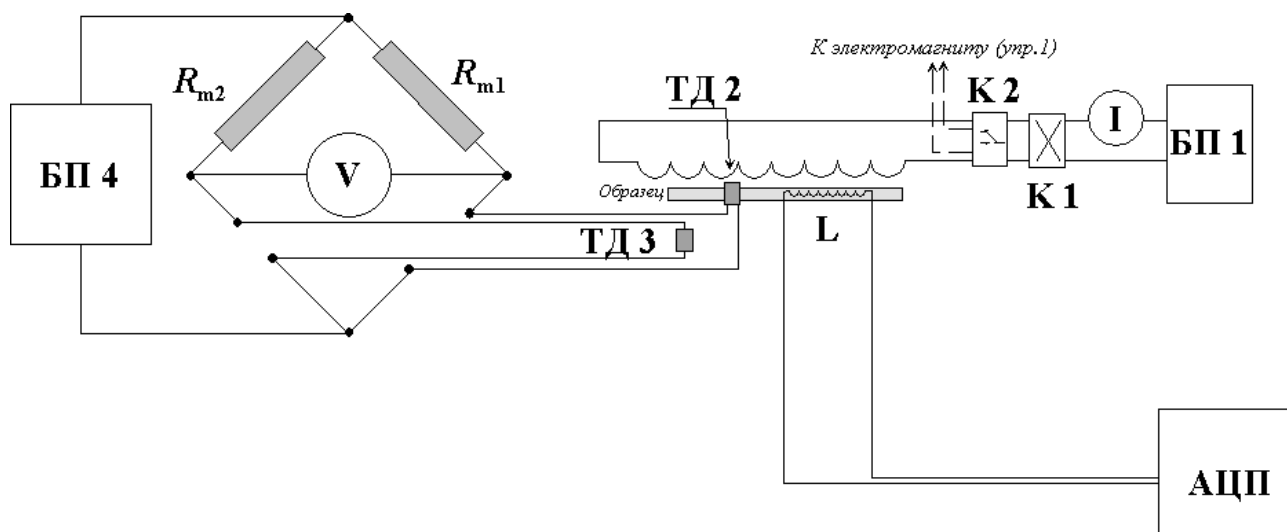
Намагниченность образца рассчитывается по формуле

$$J = \frac{B}{\mu_0} - H \quad (19)$$

Где  $B$  - индукция, определенная по формуле (18),  $H$  - напряженность магнитного поля. Постоянную соленоида считать равной 212 Эрстед / Ампер ( $16875 \text{ м}^{-1}$  в системе СИ).

В данном упражнении сбор данных производится в два этапа: при одних и тех же значениях тока в соленоиде регистрируется сигнал раскомпенсации мостовой схемы (для определения магнитострикции) и импульс напряжения в цепи измерительной катушки (для определения намагниченности образца).

Для измерения импульса  $U(t)$  АЦП переводится в режим максимального быстродействия и опрашивается только канал 3, к которому подключена измерительная катушка.



**Рис.5.** Блок-схема установки для измерения зависимости магнитострикции от магнитного поля.

Порядок работы:

Измерение магнитострикции:

- 1) Ключом К 2 подключить блок питания БП 1 к соленоиду (позиция “2”), ключ К 1 при этом должен быть разомкнут, регулятор напряжения на блоке БП 1 должен находиться в положении 0.
- 2) Включить блок питания БП 4. Установить режим стабилизации напряжения 8 вольт. Записать в рабочую тетрадь напряжение  $U_m$ .
- 3) Установить на магазинах сопротивлений значение, равное сопротивлению тензодатчика ТД 2.  $R_{12} = 401.4$  Ом. Магазином сопротивлений  $R_{m1}$  добиться компенсации мостовой схемы. Записать в рабочую тетрадь сопротивления  $R_{m1}$   $R_{m2}$  и напряжение раскомпенсации мостовой схемы.
- 4) Перевести нановольтметр в режим “10mV”, “РАЗРЕШ”.
- 5) Замкнуть ключ К 1. При помощи регулятора на блоке питания БП 1 подать на электромагнит ток 0.05 А. Записать значение тока и показания нановольтметра (напряжение раскомпенсации мостовой схемы) в рабочую тетрадь.
- 6) Регулятором напряжения на блоке БП 1 выставить следующее значение напряжения. Съемку проводить через 0.05 А до достижения тока соленоида 1 А, затем через 0.1 А до 2 А, затем через 0.25 А до значения тока 3 А.
- 7) По окончании измерений разомкнуть ключ К 1 и поставить регулятор в положение 0.

## Измерение намагниченности:

- 1) Перевести компьютерную программу в режим измерений намагниченности (“Упр.2”)
- 2) Замкнуть ключ К 1.
- 3) Регулятором напряжения на блоке БП 1 выставить значение тока 0,05 А.
- 4) Ввести текущее значение тока в ЭВМ.
- 5) Разомкнуть ключ К 1.
- 6) Перевести компьютерную программу в режим записи импульса (кнопка “Намагниченность”).
- 7) Замкнуть ключ К 1.
- 8) Наблюдать на экране импульс напряжения, после чего остановить прием данных (кнопка “Стоп”).
- 9) Регулятором напряжения на блоке БП 1 выставить следующее значение тока. Съемку проводить при тех же значениях тока в соленоиде, что и для измерений магнитострикции.
- 10) По окончании измерений разомкнуть ключ К 1 и поставить регулятор в положение 0.
- 11) Сохранить полученные данные.

## Расчет результатов эксперимента.

Сбор данных в данной задаче производится при помощи 24 битного 4-х канального АЦП типа Е-24. Каждый канал АЦП имеет две линии, таким образом, устройство имеет 8 входных линий из которых от 1 до 4 могут независимо опрашиваться одновременно. Коэффициент усиления АЦП устанавливается отдельно на каждый из работающих каналов. Порядок подключения каналов АЦП к источникам сигналов и применяемые коэффициенты усиления показаны на таблице:

| Канал     | Упражнение 1                      | Упражнение 2<br>(импульс) | Коэф.<br>Усиления |
|-----------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1 линия В | Нановольтметр                     | -                         | 0 (1)             |
| 2 линия В | Реохорд поворотного<br>устройства | -                         | 0 (1)             |
| 3 линия В | -                                 | измерит. Катушка          | 7 (128)           |
| 4 линия А | Датчик Холла 1                    | -                         | 6 (64)            |

Во всех упражнениях применяется режим “самокалибровки” АЦП т.е. калибровка нулевого значения и масштаба осуществляется по внутреннему источнику питания. Диапазон измерений АЦП в режиме с минимальным усилением (коэффициент усиления  $k = 0$ )  $\pm 2.5$  В. При этом максимальному положительному входному напряжению  $+2.5$  В соответствует код  $\frac{2^{24}}{2} = 8388608$ , нулевому отсчету - 0, максимальному отрицательному входному напряжению  $-2.5$  В соответствует код  $-8388608$ . Аналогично, в случае коэффициента усиления  $k$  код  $\pm 8388608$  будет соответствовать входному напряжению  $\frac{\pm 2.5}{2^k}$  В.

В режиме опроса измерительной катушки АЦП переводится в режим максимального быстрого действия. Частота опроса АЦП в данном случае составляет 240 Hz.

## Измерение угла поворота.

Принципиальная схема показана на рис.6. Источник питания БП 2 подает постоянное напряжение  $U_r = 2.5$  В на концы реохорда. Напряжение между одним из концов реохорда и подвижным контактом  $U_a$  пропорционально углу поворота  $\theta$ . Т.е.

$$\theta = f(U_a).$$

Вид функции  $f(x)$  определяется на основании градуировки поворотного устройства:

$$\theta [\text{град.}] = -4.12213 \cdot 10^{-5} \text{ code} + 216.905$$

где code - код АЦП (усиление 0).

Угол поворота также можно проконтролировать по лимбу поворотного устройства.

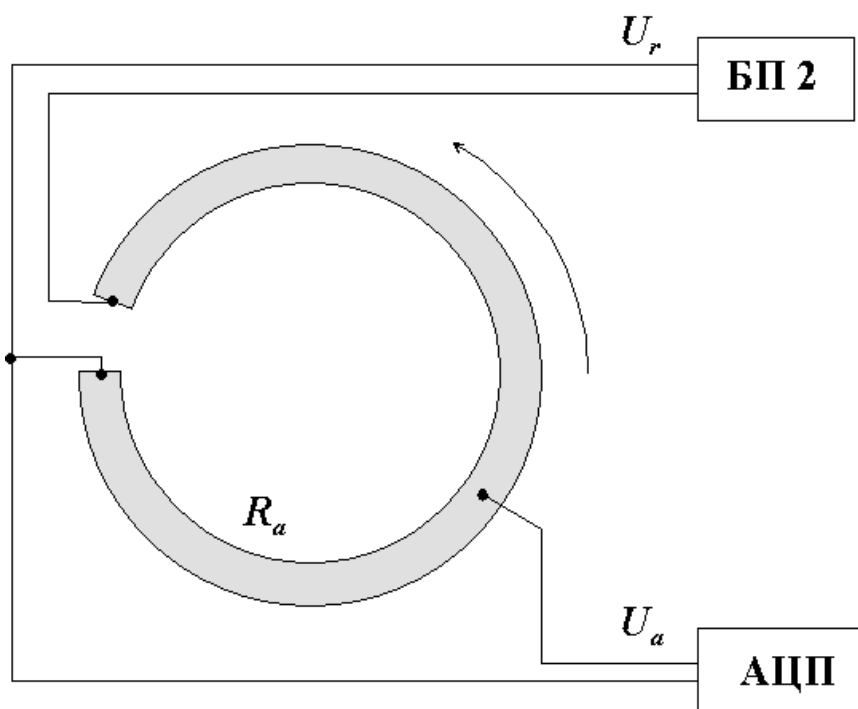


Рис.6. Измерение угла поворота образца.

### Измерение магнитного поля.

Для измерения магнитного поля используются однотипные преобразователи Холла типа ПХЭ 60. Схема подключения показана на рис.7. Стабилизатором тока для питания Холловских датчиков служит блок питания БП2. Рабочий ток датчика  $J_h = 100 \text{ mA}$ . Э.Д.С. Холла измеряется при помощи АЦП. Чувствительность преобразователя (отношение э.д.с. Холла к индукции поля) определяется экспериментально для каждой партии датчиков и составляет в данном случае  $350 \frac{\text{мкВ}}{\text{мТ}}$ . Считая, что датчик достаточно удален от образца и измеряемое поле однородным, получим

$$B = \mu_0 H,$$

$$H = \frac{B}{\mu_0}.$$

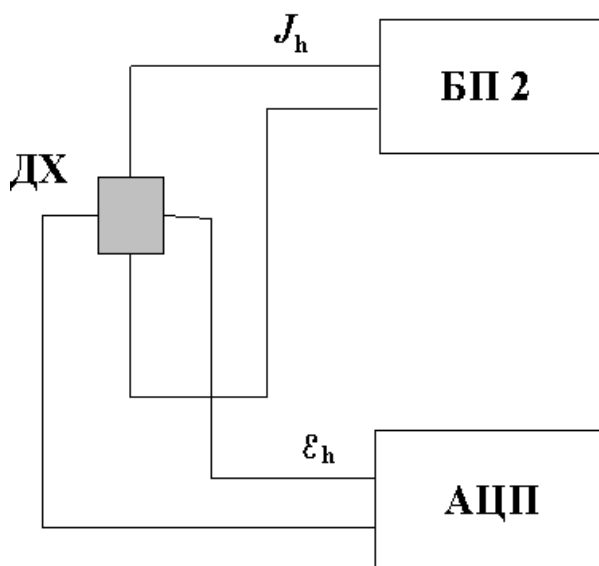


Рис.7. Измерение индукции магнитного поля.

### Измерение магнитострикции.

Принципиальная схема для измерения магнитострикции показана на рис.8. Источником стабилизированного напряжения для питания измерительного моста служит блок питания БП 4. Рабочее напряжение  $U_m$  выбирается из расчета, что максимальный рабочий ток тензодатчика - 10 мА. Тензодатчики ТД1 и ТД2 имеют сходную конструкцию, однако полное омическое сопротивление тензодатчиков и подводящих проводов различается ( $R_{ts1} = 235,2$  Ом,  $R_{ts2} = 401,4$  Ом). Поэтому для выполнения каждого из упражнений необходимо компенсировать измерительный мост, принимая в качестве исходной точки сопротивления  $R_{m1} = R_{m2} = R_{m3} = R_{ts}$ .

Нуль-индикатором измерительного моста служит нановольтметр типа В2-38. Линейный выход нановольтметра подключен через делитель напряжения к входу 1 АЦП.

Во всех режимах работы нановольтметра напряжение на линейном выходе пропорционально трем последним значащим цифрам измеряемого напряжения. Числу 999, выведенному на индикацию, соответствует напряжение 5 В на линейном выходе нановольтметра и 2.5 В на входе АЦП, т.е. коду 8388608 в режиме работы с усилением  $k = 0$ . При выполнении задачи режимы работы нановольтметра - предел измерения - "10mV", "РАЗРЕШ" - индикация 4х значащих цифр измеряемого напряжения. Рекомендуется также использовать режим "КОМПЕНС" - при нажатии соответствующей клавиши прибор записывает в память измеряемое напряжение и вычитает его из последующих показаний.



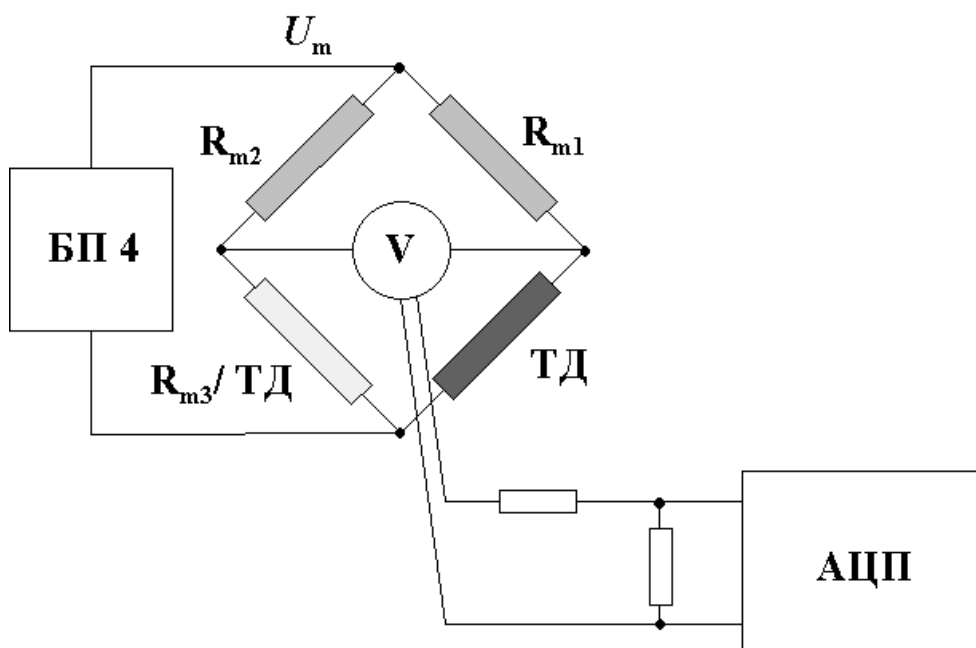


Рис.8. Измерение магнитострикции.

### Измерение намагниченности

Расчет значений намагниченности проводить, численно проинтегрировав импульс  $U(t)$  измерительной катушки при коммутации магнитного поля в соленоиде. Для расчета принять число витков в измерительной катушке  $N = 52$ , площадь сечения образца  $S = 7.07 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , частота работы АЦП  $f = 240 \text{ Hz}$ .

К отчету о задаче представить следующие результаты:

### Упражнение 1.

- Вычислить значение напряженности магнитного поля по показаниям датчика Холла.
- Вычислить зависимость магнитострикции насыщения поликристалла никеля от угла измерений. Используя измеренное значение  $U_R^{180}$  рассчитать поправку к измерениям магнитострикции, связанную с температурным дрейфом и вычесть ее из результатов  $U(\theta)$ . Температурный дрейф сопротивления тензодатчика считать линейным по времени, т.е.

$$U(t) = U_\lambda(t) + U_R(t) ,$$

где  $U(t)$  - измеряемое напряжение,

$U_\lambda(t)$  - полезный сигнал, вызванный деформацией образца,

$U_R(t) = \alpha \cdot t$  - сигнал раскомпенсации,  $\alpha$  - коэффициент пропорциональности, который вычисляется из пропорции:

$$U_R(0, H = 0) = U_R^0$$

$$U_R(\theta = 180^\circ, H = 0) = U_R^{180}$$

По полученной зависимости  $\lambda(\theta)$  оценить соотношение продольной и поперечной магнитострикции насыщения.

### Упражнение 2.

- График зависимости индукции образца от напряженности магнитного поля.
- График зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля.
- График зависимости магнитострикции от намагниченности.

### Литература.

- Кринчик Г.С., “Физика магнитных явлений”, Москва 1976 (стр. 172-186).  
Вонсовский С.В., “Магнетизм”, Москва, 1971. (стр. 918-925)  
Чечерников В.И., “Магнитные измерения”, Москва 1963. (стр. 111-127).  
Etienne du Tremolet de Lacheisserie, “Magnetostriction: Theory and Applications of Magnetoelasticity”, CRC Press, London 1993. (Chapter 5).

## Приложение 1.

Формат файла, содержащего результаты эксперимента (пример):

```
//// MAGNETOSTRICTION ////  
//// VERSION 1.00 ////
```

<-Заголовок файла

```
NAME: Петров Иван  
GROUP: 419  
FILENAME: petr_419  
CREATED: 26.11.04 12:28:16
```

```
/// UPR 1  
/// Current: 4 A  
/// ANGLE  TENZOSENSOR  HALL SENSOR  
5366745  2566271  3253093  
5366753  2584285  3253080  
5366755  2601218  3254744  
5366756  2615134  3257868  
.....  
833896  5632188  3129183  
833892  5625295  2910611  
833873  4028764  -34  
833874  3184419  -31  
833874  3197453  -36
```

<- Упражнение 1

<- Значение тока в электромагните

<- Данные с реохорда, нановольтметра и датчика Холла соответственно (в каждой строке 3 целых числа, между ними 5 пробелов).

```
/// UPR 2  
/// COIL SIGNAL  
CURRENT = 0.05
```

<- Упражнение 2

<- Значение тока в соленоиде

<- Зарегистрированный импульс напряжения в измерительной катушке при включении магнитного поля (21 строка). Интервал времени между зарегистрированными значениями напряжения считать равным частоте работы АЦП в данном режиме (т.е.  $t_{i+1} - t_i = \frac{1}{f}$ ).

```
33  
27  
0  
12  
56  
45  
2  
8  
53  
140389  
297224  
132152  
255980  
165169  
132143  
206401  
49596  
206401  
57849  
107364  
115646  
SUMM = 1808711  
MAX VALUE = 297224
```

<- Параметры импульса (для расчета не используются)

```
/// COIL SIGNAL  
CURRENT = 0.1
```

<- То же для следующего значения тока... .

## Приложение 2. Общий вид установки.

