

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕ-  
ЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИС-  
СЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Галактионов Михаил Михайлович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение температурной зависимости смещения нуля датчика Холла**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18352

**Научный руководитель:**

Штро Константин Сергеевич

Оценка научного руководителя

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума:**

Костюрина Александра Георгиевна

Оценка преподавателя практикума

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. Астрелин Виталий Тимофеевич

Итоговая оценка

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2019г

## Аннотация

Цели данной работы – измерение температурной зависимости ЭДС Холла, в отсутствии магнитного поля, и определение температурного коэффициента чувствительности. Используя датчик Холла HE144T, измерялась зависимость ЭДС Холла ( $U_H$  мВ) от температуры ( $T$ , К) при нулевом магнитном поле (в магнитном экране):

$$U_H \cong -5,2 \cdot 10^{-3} \cdot (T \pm 0,83) + 3,61 \pm 0,003.$$

Затем измерялась та же зависимость в поле неизвестного магнита. Измерения проводились в диапазоне 298–348 К. Подаваемый на датчик ток =1 мА. Из полученных данных была найдена зависимость ЭДС Холла, индуцированной полем магнита, от температуры. Затем построен график зависимости относительного изменения ЭДС Холла от температуры. Коэффициент угла наклона получившейся прямой это температурный коэффициент чувствительности:  $\cong -5,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}}$ .

В техническом описании HE144T сказано, что температурный коэффициент чувствительности при  $B=1$  Тл,  $I=1$  мА,  $t=25$  °С обычно равен:  $-1,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}}$ , но может меняться от  $-2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}}$  до  $2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}}$ .

Полученный результат превышает примерно в 3 раза, заявленный производителем датчика. Проведен анализ погрешностей. Выявлено, что допущена методологическая ошибка при определении относительного изменения ЭДС Холла от температуры. Требуется продолжение исследования для определения температурного коэффициента чувствительности.

Ключевые слова: ЭДС Холла, датчик Холла, эффект Холла, температурный коэффициент чувствительности датчика Холла, нулевое магнитное поле.

## Оглавление

1. Введение.....	4
<u>Теоретическая часть</u>	
2. Физические основы эффекта Холла.....	4
3. Четырехпроводные схемы.....	7
<u>Экспериментальная часть</u>	
4. Описание установки.....	9
5. Методика.....	11
6. Результаты .....	13
7. Анализ погрешностей .....	15
8. Обсуждение результатов .....	16
9. Выводы.....	17
10. Благодарности.....	18
11. Библиографический список .....	18

## Введение

Датчики, использующие эффект Холла для определения магнитного поля, применяются достаточно широко. Например, в датчиках тока, вибрации или угла поворота, при картографировании полей.

В данной работе проводится исследование температурной зависимости ЭДС Холла при отсутствии магнитного поля. Исходя из этой зависимости, находится её влияние на определение величины вектора магнитной индукции. Полученные результаты могут быть использованы для увеличения точности определения вектора магнитного поля.

## Теоретическая часть

### Физические основы эффекта Холла

Эффект Холла заключается в отклонении траектории движения зарядов в проводнике с током из-за того, что в магнитном поле на них действует сила Лоренца (1). Заряды отклоняются к одной из граней перпендикулярной току и магнитному полю. Отклонённые заряды создают недостаток зарядов у одной из граней и избыток у другой, тем самым создавая электрическое поле. Это поле называется полем Холла  $E_H$  (см. рис. 1).

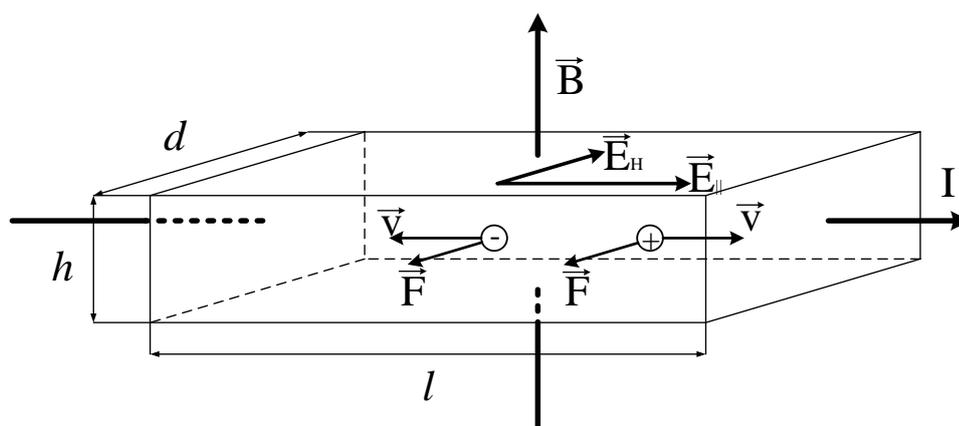


Рис. 1. Модель датчика Холла, где  $h$ ,  $d$  и  $l$  соответственно высота, ширина и длина датчика Холла;  $I$  – ток, протекающий через датчик;  $B$  – вектор внешнего магнитного поля;  $E_H$  – поле Холла;  $E_{||}$  – электрическое поле параллельное току  $I$ ;  $F$  – сила, действующая на частицу проводимости;  $v$  – скорость частицы проводимости

Сила Лоренца, действующая на эти заряды, выглядит следующим образом:

$$\mathbf{F}_л = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}[\mathbf{v}_T \times \mathbf{B}] + \frac{q}{c}[\mathbf{v}_D \times \mathbf{B}], \quad (1)$$

где  $\mathbf{E}$  – электрическое поле в проводнике;  $q$  – заряд частиц, обеспечивающих проводимость;  $\mathbf{v}_T$  – средняя скорость теплового движения частиц проводимости;  $\mathbf{v}_D$  – средняя скорость дрейфа частиц;  $\mathbf{B}$  – вектор внешнего магнитного поля;  $c$  – скорость света.

Если рассмотреть движение частицы без учета столкновений с другими частицами, то под действием перпендикулярно направленных магнитного и электрического полей она будет вращаться по окружности радиуса  $R$  в плоскости перпендикулярной вектору магнитного поля и перемещаться с дрейфовой скоростью  $\mathbf{v}_d$  в направлении перпендикулярном электрическому и магнитному полям.  $R$  и  $\mathbf{v}_d$  равны соответственно:

$$R = \frac{mc}{qB^2} |[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]|, \quad \mathbf{v}_d = \frac{c}{B^2} [\mathbf{E} \times \mathbf{B}],$$

где  $m$  – эффективная масса частицы, учитывающая влияние периодического поля на движение частицы в веществе;  $\mathbf{v}$  – скорость частицы;  $\mathbf{v}_d$  – дрейфовая скорость частицы.

Если рассматривать движение частицы с учетом столкновений с другими частицами, то нужно разобрать два случая: сильного и слабого поля. Если за время  $\tau$  (среднее время между столкновениями частиц) частица приобретает добавку к скорости много меньше чем  $\langle |\mathbf{v}_T| \rangle$  (средняя скорость теплового движения частиц проводимости по модулю), то такое поле называется слабым и в его приближении  $\mathbf{v}_D \ll \langle |\mathbf{v}_T| \rangle$ . Следовательно,  $\mathbf{v}_D$  не влияет на  $\tau$ , а значит  $\tau$  не зависит от внешнего поля  $\mathbf{E}$ , так как  $\mathbf{v}_D$  пропорциональна  $\mathbf{E}$ .  $\mathbf{v}_D = u \cdot \mathbf{E}$ , где  $u$  – подвижность частиц проводимости. В случае когда за время  $\tau$  частица проводимости проходит расстояние много больше  $r_g$  (Ларморовский радиус) поле

называют сильным. В этом случае частицы проводимости вращаются по орбитам, совершив большое количество оборотов, прежде чем рассеются. В данной работе не применялись сильные магнитные поля, поэтому рассматривать этот случай не будем.

Рассмотрим уравнение силы Лоренца (1). Средняя скорость теплового движения частиц проводимости равна нулю, потому что нет никакого теплового потока этих частиц. Следовательно, второе слагаемое в уравнении (1) тоже равно нулю. Разделим вектор  $\mathbf{E}$  на два вектора (см. рис. 1):  $\mathbf{E}_{\parallel}$  – параллельный полному току  $\mathbf{I}$ ;  $\mathbf{E}_{\perp}$  – перпендикулярный  $\mathbf{E}_{\parallel}$  и магнитному полю. Тогда взятое перпендикулярное поле  $\mathbf{E}_{\perp}$  это и есть поле Холла  $\mathbf{E}_H$ , которое уравнивает силу Лоренца, вызванную внешним магнитным полем:

$$q\mathbf{E}_H + \frac{q}{c}[\mathbf{v}_D \times \mathbf{B}] = 0. \quad (2)$$

Из уравнения (2) можно найти ЭДС Холла  $U_H$ . Пусть частицами проводимости будут являться электроны. Тогда для определения  $U_H$  воспользуемся уравнениями:

$$U_H = (\mathbf{E}_H \cdot \mathbf{d}), \quad \mathbf{j}_{\parallel} = -en\mathbf{v}_D, \quad R_H = -\frac{1}{en}, \quad \mathbf{I} = \mathbf{j}_{\parallel}S = \mathbf{j}_{\parallel}hd,$$

где  $d$  – ширина, а  $h$  – высота прямоугольного проводника;  $\mathbf{d}$  – вектор, направленный вдоль ширины и  $|\mathbf{d}| = d$ ;  $e$  – заряд электрона;  $n$  – концентрация электронов проводимости;  $R_H$  – постоянная Холла;  $\mathbf{I}$  – полный ток;  $\mathbf{j}_{\parallel}$  – плотность тока.

$\mathbf{d}$  – это вектор, направленный от одной эквипотенциальной точки к другой в местах где припаяны измерительные провода к датчику. Используя уравнения выше, можно определить поле Холла:

$$\mathbf{E}_H = \frac{[\mathbf{v}_D \times \mathbf{B}]}{c} = -\frac{[\mathbf{j}_{\parallel} \times \mathbf{B}]}{en} = \frac{R_H[\mathbf{I} \times \mathbf{B}]}{hd}.$$

Рассматривается случай, когда  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{I}$  перпендикулярны (см. рис. 1), тогда ЭДС Холла будет определён следующим образом:

$$U_H = \frac{R_H \cdot I \cdot |B|}{h} = S \cdot |B|,$$

где  $S$  – коэффициент чувствительности.

Тот факт, какими частицами будет обусловлена проводимость, в полупроводниках зависит от валентности примеси. Если валентность примеси больше валентности основного кристалла, то полупроводник обладает электронной проводимостью ( $n$ ). Электроны на больших энергетических уровнях в примеси будут перемещаться на энергетически выгодные им уровни соседних атомов. В противоположном случае полупроводник обладает дырочной проводимостью ( $p$ ). Электроны из атомов кристалла могут перейти к атому примеси и в этом случае будет перемещаться отсутствие электрона (дырка).

Если учитывать распределение носителей по скоростям и проводимость как электронов, так и дырок, то постоянная Холла будет выглядеть следующим образом:

$$R_H = \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle^2} \frac{u_p^2 p - u_n^2 n}{e(u_p p + u_n n)^2},$$

где  $u$  – подвижность;  $n$  – концентрация электронов;  $p$  – концентрация дырок;  $e$  – заряд электрона;  $\tau$  – время между столкновениями частиц; индексы  $p$  и  $n$  для дырок и электронов соответственно.

## Четырехпроводные схемы

При проведении измерений через датчик Холла должен пропускаться стабильный постоянный ток. Для того, чтобы не изготавливать стабильный генератор тока, было предложено использовать точный измеритель сопротивления, способный работать в так называемой четырёхпроводной схеме. Для объ-

яснения, как такой омметр может применяться в измерениях ЭДС Холла, остановимся на принципах работы четырёхпроводной схемы подробнее (см. рис. 2).

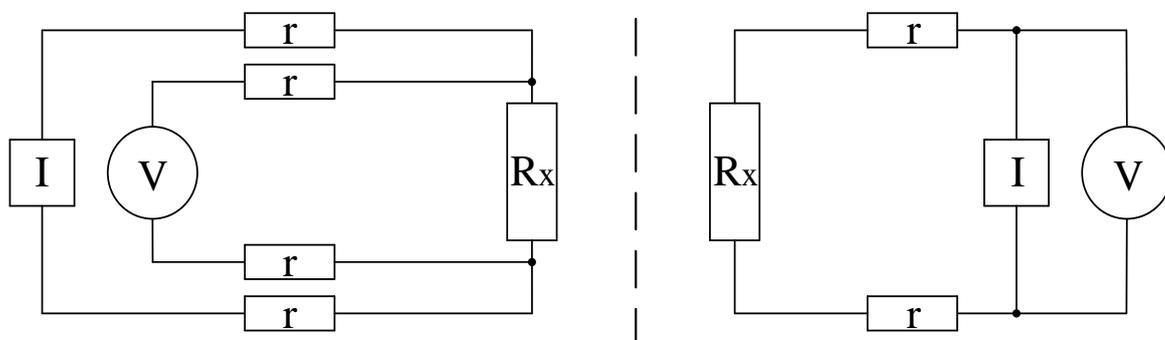


Рис. 2. Схемы для измерения неизвестного сопротивления  $R_x$  слева четырёхпроводная, справа двухпроводная, где  $I$  – источник тока;  $V$  – вольтметр;  $r$  – сопротивления соединительных проводов

Принцип работы заключается в том, что ток с источника тока подаётся на образец от встроенного в прибор генератора тока через одну пару соединительных проводов, а измерение напряжения идёт через другую в отличие от двухпроводной схемы, где измерение напряжения и подача тока осуществляется через одну пару проводов. Так как сопротивление источника тока достаточно велико, то ток через измеряемый образец не зависит от сопротивления проводов, а благодаря тому, что входное сопротивление вольтметра тоже велико, то ток не будет течь через соединительные провода вольтметра и, следовательно, на них не будет падения напряжения. Это означает, что сопротивление соединительных проводов не влияет на измеряемое вольтметром напряжение.

Во время измерения ЭДС Холла четырёхпроводной схемой, мультиметр находится в режиме омметра. Он пускает ток через датчик Холла и замеряет поперечное напряжение на эквипотенциальных точках (см. рис. 3), а затем де-

лит напряжение на ток и выдаёт результат в Омах на табло. Замерив, пускаемый вольтметром ток и использовав закон Ома, можно найти ЭДС Холла. Этот ток равен 1 мА.

## Экспериментальная часть

### Описание установки

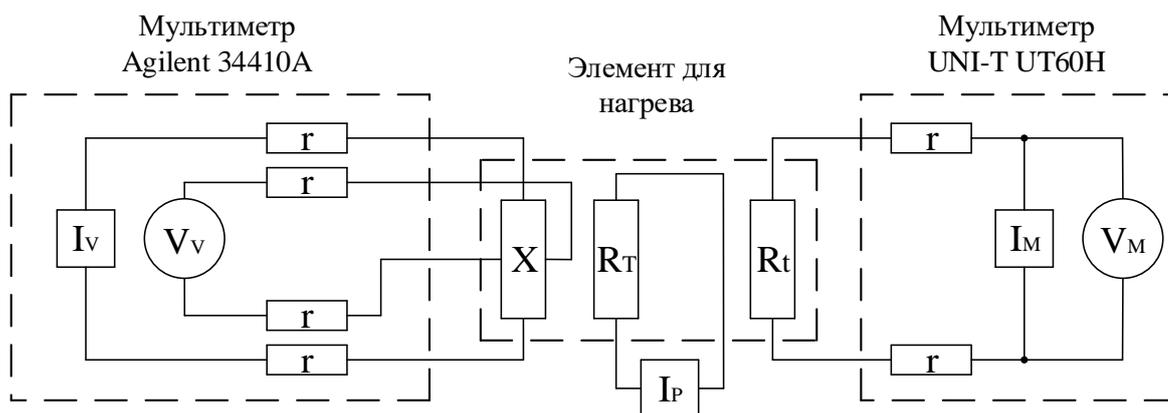


Рис. 3. Схема установки для изучения температурной зависимости ЭДС Холла, где  $I_M$  – источник тока в мультиметре UNI-T UT60H;  $I_V$  – источник тока в мультиметре Agilent 34410A;  $I_P$  – источник питания GPS-72303;  $r$  – сопротивления подводящих проводов;  $R_T$  – набор резисторов для нагрева;  $R_t$  – терморезистор;  $V_M$  – вольтметр в мультиметре UNI-T UT61;  $V_V$  – вольтметр в мультиметре Agilent 34410A;  $X$  – датчик Холла HE144T

Элемент для нагрева представляет собой брусок алюминиевого немагнитного сплава, в который встроены резисторы, выполняющие роль нагревателей. В брусок встроены платиновый терморезистор для определения температуры бруска. Сверху на бруске плотно прижат датчик Холла для наибольшего теплообмена.

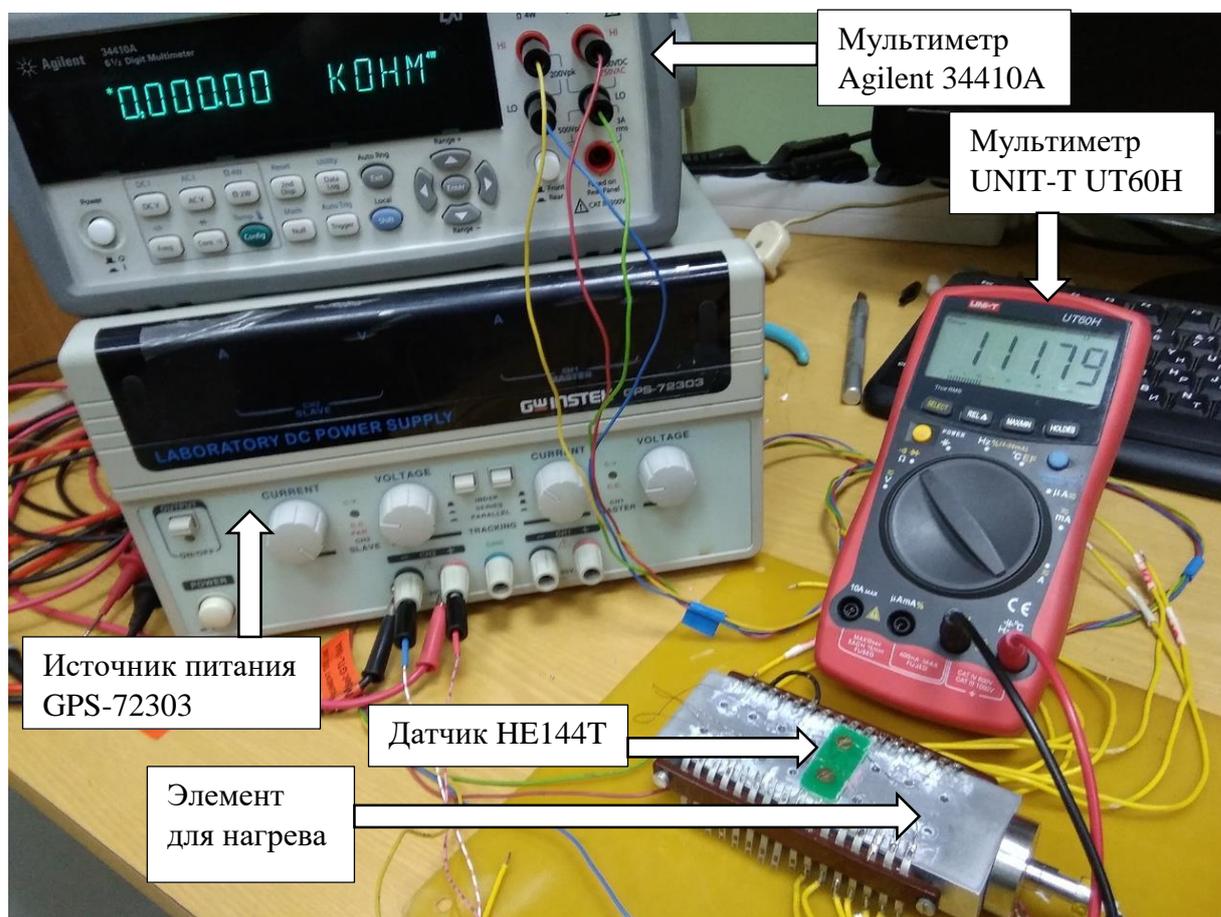


Рис. 4. Фотография установки

Набор резисторов для нагрева подсоединяется к источнику питания GPS-72303. Сопротивление платинового терморезистора измеряется мультиметром UNI-T UT60H, оно равно 100 Ом при 0 °С и изменяется на 0,39 Ом при изменении температуры на 1 °С. ЭДС Холла измеряется с помощью четырёхпроводной схемы мультиметром Agilent 34410A.

Во время эксперимента нагреватель с датчиком помещаются в пенопластовую форму для наименьшего теплообмена с окружающей средой. Для измерения ЭДС в нулевом поле, форма устанавливается в магнитный экран из пермаллоя, а при измерениях с полем магнитный экран не используется.

Датчик Холла HE144Т обладает рабочим диапазоном температур 233 – 398 К.

Все расчеты проводятся по данным, полученным при остывании. Потому что этот процесс более стабилен, нежели нагрев. Следовательно, результаты будут точнее, чем при нагреве.

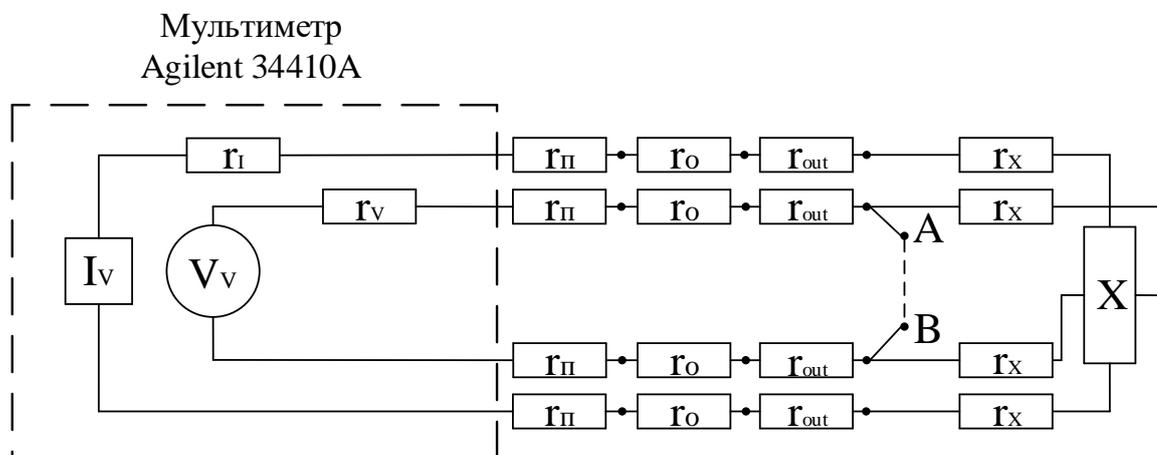


Рис. 5. Подробная схема соединения датчика Холла с измерительным мультиметром Agilent 34410A, где точка на проводе это спай;  $r_X$  – сопротивления проводов от датчика;  $r_{out}$  – сопротивление выводов;  $r_o$  – сопротивления отводящих проводов;  $r_{П}$  – сопротивления подводящих к мультиметру проводов;  $r_V$  – внутреннее сопротивление вольтметра;  $r_I$  – внутреннее сопротивление источника тока;  $V_V$  – вольтметр в мультиметре;  $I_V$  – источник тока в мультиметре; А и В – точки для замыкания цепи измерения

Выводы представляют собой плоские прямоугольные «ножки», к которым припаяны провода от датчика Холла с одной стороны и отводящие провода с другой. А отводящие провода в свою очередь спаяны с подводящими к вольтметру проводами.

## Методика

1. По схеме (см. рис. 3) собирается установка для измерений в нулевом поле с пенопластовой формой и магнитным экраном.

2. Включается источник питания, датчик нагревается примерно до  $77\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а затем при токе и напряжении источника  $I=1,36\text{ A}$  и  $U=4,8\text{ V}$  он прогревается. Далее источник отключается и проводится измерение сопротивлений мультиметрами Agilent 34410A и UNI-T UT60H при остывании, а результаты заносятся в таблицу (см. табл.).

3. Убирается экран и сверху на пенопластовую форму над датчиком Холла устанавливается прямоугольный магнит.

4. Проводятся те же действия, что и в пункте 2.

5. Исходя из полученных сопротивлений строятся графики зависимости ЭДС Холла от температуры (см. рис. 6). Используются следующие формулы:

$$U_H = R_V I_V = R_V \cdot 0,001 \text{ A},$$
$$T = \frac{R_M - R_0 - r}{\frac{dR}{dt^\circ}} + 273 \text{ K} = \frac{R_M - 100 \text{ Ohm} - r}{0,39 \frac{\text{Ohm}}{\text{C}^\circ}} + 273 \text{ K},$$

где  $U_H$  – ЭДС Холла;  $r$  – сопротивление соединительных проводов от мультиметра UNI-T UT60H;  $\frac{dR}{dt^\circ}$  – изменение сопротивления терморезистора при изменении температуры на 1 °C;  $R_0$  – сопротивление терморезистора при 0 °C;  $T$  – температура датчика HE144T;  $R_V$  и  $I_V$  – сопротивление, показанное мультиметром Agilent 34410A, и ток, пускаемый им соответственно;  $R_M$  – сопротивление, показанное мультиметром UNI-T UT60H.

6. Измеренная ЭДС Холла и вызванная непосредственно полем, связаны следующим соотношением:

$$U_{Hm}(T, \vec{B}) = U_{H0}(T, |\vec{B}| = 0) + U_{HB}(T, \vec{B}),$$

где  $U_{Hm}$  – измеренное значение ЭДС Холла;  $U_{H0}$  – ЭДС Холла при отсутствии магнитного поля;  $U_{HB}$  – ЭДС Холла, индуцированная магнитным полем.

Из последнего уравнения можно найти зависимость ЭДС Холла, вызванной магнитным полем от температуры. Строится график этой зависимости (см. рис. 6).

7. Для определения температурного коэффициента чувствительности строится график зависимости относительного изменения ЭДС Холла ( $\delta$ , %) от температуры (см. рис. 7) и коэффициент угла наклона этой зависимости будет равен температурному коэффициенту чувствительности.  $\delta_i$  (относительное изменение при  $i$ -ой температуре) определяется следующим образом:

$$\delta_i = \frac{|U_{Ht} - U_{Hi}|}{U_{Ht}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $U_{Ht}$  – ЭДС Холла от поля при 300 К;  $U_{Hi}$  – ЭДС Холла от поля при  $i$ -ой температуре.

## Результаты

Исходные данные предоставлены в таблице (см. табл.).

Таблица. Сопротивления, полученные в ходе экспериментов, а также рассчитанные исходя из них ЭДС Холла и температура при остывании элемента для нагрева, в отсутствии магнитного поля и с неизвестным магнитным полем В

Без поля				С полем В			
R <sub>н</sub> , Ом	R <sub>t</sub> , Ом	U <sub>н</sub> , мВ	T, К	R <sub>н</sub> , Ом	R <sub>t</sub> , Ом	U <sub>н</sub> , мВ	T, К
1,84	26,8	1,84	341	4,05	29,2	4,05	347
1,85	25,6	1,85	338	4,06	28,4	4,06	345
1,86	25	1,86	336	4,07	27,9	4,07	344
1,87	24,2	1,87	334	4,08	27,3	4,08	342
1,88	23,5	1,88	332	4,09	26,6	4,09	341
1,89	22,8	1,89	331	4,1	25,9	4,1	339
1,9	22,2	1,9	329	4,11	25,2	4,11	337
1,91	21,4	1,91	327	4,12	24,8	4,12	336
1,92	20,7	1,92	325	4,13	24	4,13	334
1,93	19,8	1,93	323	4,14	23,5	4,14	333
1,94	19,2	1,94	321	4,15	22,8	4,15	331
1,95	18,4	1,95	319	4,16	22,4	4,16	330
1,96	17,6	1,96	317	4,17	21,7	4,17	328
1,97	16,8	1,97	315	4,18	21,1	4,18	326
1,98	16,1	1,98	313	4,19	20,66	4,19	325
1,99	15,5	1,99	312	4,2	20	4,2	324
2	14,6	2	309	4,21	19,5	4,21	322
2,01	13,7	2,01	307	4,22	19	4,22	321
2,02	13	2,02	305	4,23	18,3	4,23	319
2,03	12,3	2,03	304	4,24	17,7	4,24	318
-	-	-	-	4,25	17,1	4,25	316
-	-	-	-	4,26	16,3	4,26	314
-	-	-	-	4,27	15,6	4,27	312
-	-	-	-	4,28	15,05	4,28	311
-	-	-	-	4,29	14,4	4,29	309

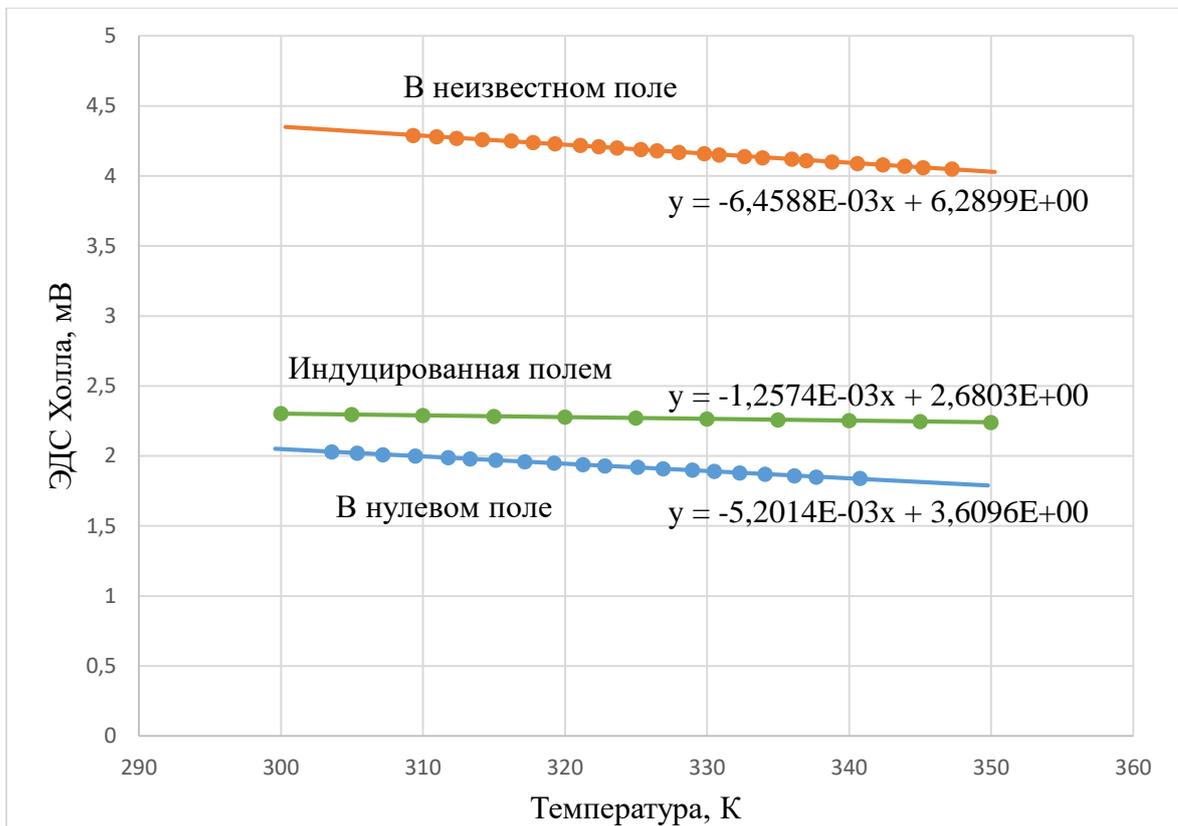


Рис. 6. Графики зависимости ЭДС Холла от температуры в нулевом поле, в поле неизвестного магнита и рассчитанная ЭДС, индуцированная этим магнитом

Температурный коэффициент чувствительности  $\cong -5,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}}$ .

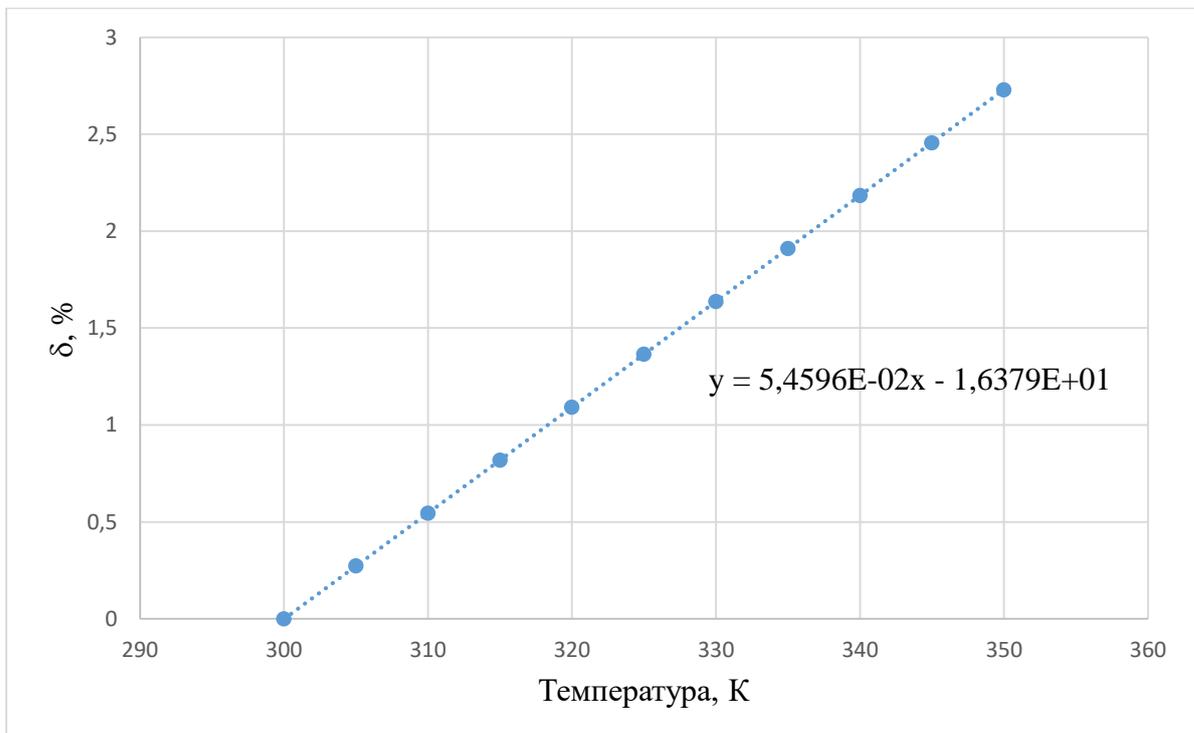


Рис. 7. График зависимости относительного изменения ЭДС Холла от температуры

## Анализ погрешностей

1. При расчете температуры элемента для нагрева для наиболее точной оценки вычитается сопротивление соединительных проводов. В эксперименте без поля это сопротивление  $\approx 0,37$  Ом, а во время эксперимента с полем провода были заменены для удобства и их сопротивление  $\approx 0,24$  Ом.

2. Определяется абсолютная погрешность измерения ЭДС Холла, вносимая мультиметром Agilent 34410A, по следующей формуле:

$$k = \pm \frac{\Delta R}{R_{MAX}} \cdot 100\%,$$

где  $k$  – класс точности;  $\Delta R$  – абсолютная погрешность измеряемой величины;  $R_{MAX}$  – максимальное значение измеряемой величины на шкале прибора.

Класс точности мультиметра Agilent 34410A  $= \pm 0,003\%$ . Исходя из предыдущей формулы, можно найти абсолютную погрешность измерения сопротивления, связанную с прибором.  $\Delta R = \pm 0,03$  Ом при  $R_{MAX} = 100$  Ом. Эта ошибка повлияет на определение ЭДС Холла следующим образом:

$$\delta = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta U_H}{U_H}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – относительная погрешность.

Вычисленные из формулы (4) абсолютная и относительная погрешности определения ЭДС Холла мультиметром Agilent 34410A равны соответственно:  $\Delta U_H = 0,003$  мВ;  $\delta_{Agilent} = 3 \cdot 10^{-5}$ .

3. Точно так же можно определить  $\Delta T$ . Класс точности UNI-T UT60H на измеряемом диапазоне  $= \pm 0,8\%$ ,  $R_{MAX} = 400$  Ом и ещё прибор обладает абсолютной погрешностью  $= \pm 0,1$  Ом. Для этого мультиметра  $\Delta R = 3,3$  Ом, а из соотношения:  $\delta = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta T}{T}$ , можно найти абсолютную погрешность измерения температуры:  $\Delta T = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_i}{n} \cong 0,83$  К. Берётся средняя абсолютная погрешность из выборки всех измерений температур в эксперименте (см. табл.).

## Обсуждение результатов

В техническом описании HE144T сказано, что температурный коэффициент чувствительности при  $V=1$  Тл,  $I=1$  мА,  $t=25$  °С обычно равен:  $-1,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}}$ , но может меняться от  $-2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}}$  до  $2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}}$ .

Найденный температурный коэффициент чувствительности:

$$\cong -5,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}}$$

Полученный результат превышает примерно в 3 раза, заявленный производителем датчика. Погрешность приборов, выявленная в разделе «Анализ погрешностей» много меньше полученной разности в значениях. Также разница между температурой платинового терморезистора, которая была вычислена, и датчика Холла, на поверхности алюминиевого бруска, не ощутима, так как охлаждение происходит равномерно и линейные размеры датчика много меньше размеров алюминиевого бруска. Т. е. можно сказать, что температура датчика равна температуре терморезистора.

Был проведён эксперимент по поиску термо-ЭДС, возможно возникающей на контактах спаев проводов в схеме (см. рис. 5). Измерительная схема мультиметра Agilent 34410А была закорочена в точках А и В. Затем замерялась температурная зависимость напряжения на вольтметре, но зафиксировать предполагаемое напряжение не удалось. Получаемые значения были в области шумов. Это означает, что влияние термо-ЭДС на определение температурного коэффициента чувствительности пренебрежительно мало.

Возможно различие полученных данных с данными заявленными производителем заключается в том, что он измерял ЭДС Холла напрямую высокочувствительными щупами ещё до того, как прикрепить к датчику провода. Проверить данную гипотезу не представляется возможным.

Возможно ошибка в методике измерений, а именно в определении относительного изменения ЭДС Холла от температуры. В формуле (3) используется отклонение от значения при 300 К, а значит при меньшей температуре определённый таким образом температурный коэффициент чувствительности не будет являться достоверным. Так как рабочий диапазон температур датчика 233 – 398 К, то для точного определения, нужно рассчитывать искомый коэффициент по следующей формуле:

$$k_T = \frac{dU_H}{U_{Max} \cdot dT} = \frac{U_{Hi} - U_{Hj}}{U_{Max} \cdot (T_i - T_j)},$$

где  $U_{Hi}$  – ЭДС Холла  $i$ -ого измерения;  $U_{Hj}$  – ЭДС Холла  $j$ -ого измерения;  $T_i$  – температура  $i$ -ого измерения;  $T_j$  – температура  $j$ -ого измерения;  $U_{Max}$  – максимальное значение ЭДС Холла в рабочем диапазоне температур датчика.

Температуры лежат в следующем диапазоне:  $233 \text{ K} \leq T_i, T_j \leq 398 \text{ K}$  и  $U_{Max}$  следует брать при температуре 233 К.

Для того чтобы определить температурный коэффициент чувствительности HE144Т, нужно провести эксперименты в более широком диапазоне температур.

## Выводы

Найденная для датчика HE144Т температурная зависимость смещения нуля выглядит следующим образом в диапазоне температур 298–348 К:

$$U_H \cong -5,2 \cdot 10^{-3} \cdot (T \pm 0,83) + 3,61 \pm 0,003.$$

Найденный температурный коэффициент чувствительности:

$$k_T \cong -5,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{K}}.$$

Но допущена методологическая ошибка, из-за которой полученное значение  $k_T$  не является достоверным.

## Благодарности

Я хочу выразить свою благодарность Штро Константину Сергеевичу за предложенную тему для исследования, за предоставление оборудования, а также за обсуждение методов исследования и самой работы.

## Библиографический список

1. <https://elmag.nsu.ru/doku.php?id=lab4:lab4> – информация про эффект Холла;
2. <https://www.astena.ru/34410a.html> – технические характеристики мультиметра Agilent 34410A;
3. <https://www.asensor.eu/onewebmedia/Datasheet-HE144X.pdf> – технические данные о датчике Холла HE144T;
4. [https://masteram-online.ru/content\\_file/product/819448/UT60H.PDF](https://masteram-online.ru/content_file/product/819448/UT60H.PDF) – технические данные мультиметра UNI-T UT60H;
5. Herbert Weiss Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов и их применение. Пер. с нем.. Под ред. О. К. Хомерики. М., «Энергия», 1974. 384 с. с ил.