

Вопрос по выбору. Эффект Холла, автоматизация лабораторной работы и ферромагнетики. (Винни-Пух и все-все-все)

Анна Назарчук Б02-109

1. Цели

Провести эксперимент по исследованию ЭДС Холла, уменьшить погрешности результатов за счет автоматизации работы, возможно, найти новые качества в работе.

2. Теория про эффект Холла

Во внешнем магнитном поле B на заряды действует сила Лоренца:

$$F = qE + qu \times B \quad (1)$$

Эта сила вызывает движение носителей, направление которого в общем случае не совпадает с E . Действительно, траектории частиц будут либо искривляться, либо, если геометрия проводника этого не позволяет, возникнет дополнительное электрическое поле, компенсирующее магнитную составляющую силы Лоренца. Возникновение поперечного тока электрического поля в образце, помещённом во внешнее магнитное поле, называют эффектом Холла.

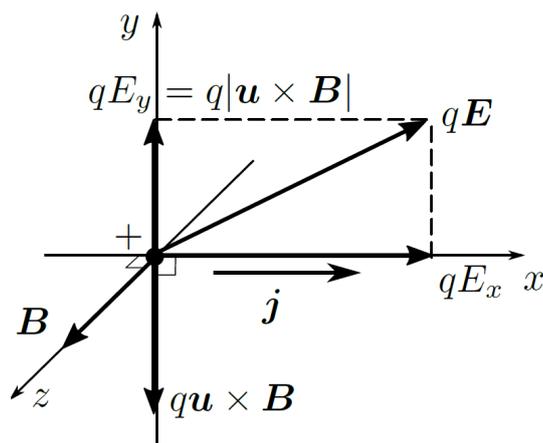


Рис. 1: Силы, действующие на положительный носитель заряда в проводящей среде при наличии магнитного поля

Пусть система содержит носители только одного типа (например, электроны, как в большинстве металлов). Рассмотрим случай плоской геометрии: пусть ток течёт вдоль оси x , а магнитное поле направлено вдоль оси x (см. рис. 1). Магнитное поле действует на

движущиеся заряды с силой $F_y = -qu_x B_z$ по оси y . Ток сможет течь строго вдоль оси x , если заряды в среде перераспределятся таким образом, чтобы полностью скомпенсировать магнитную силу, создав в направлении y электрическое поле:

$$E_y = u_x B_z = \frac{j_x}{nq} B_z \quad (2)$$

называемое холловским (здесь n — концентрация носителей). По оси x носители будут двигаться так, как если бы магнитного поля не было: $j_x = \sigma_0 E_x$ ($j_y = j_z = 0$), где $\sigma_0 = qn\mu$ — удельная проводимость среды в отсутствие B .

Для исследования зависимости проводимости среды от магнитного поля в данной работе используется мостик Холла (рис. 2). В данной схеме ток вынуждают течь по оси x вдоль

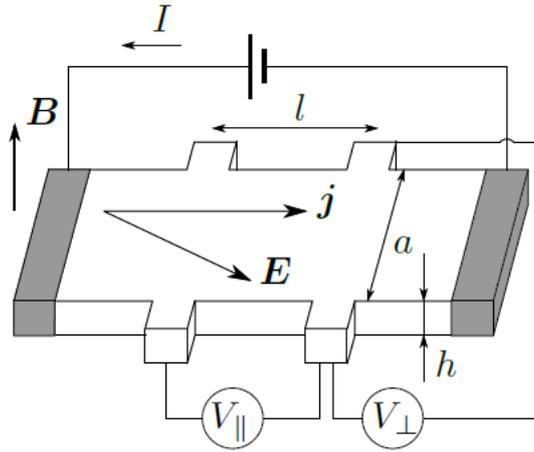


Рис. 2: Схема для исследования влияния магнитного поля на проводящие свойства - мостик Холла

плоской пластинки (ширина пластинки a , толщина h , длина l). Сила Лоренца, действующая со стороны перпендикулярного пластинке магнитного поля, «прибивает» носители заряда к краям образца, что создаёт холловское электрическое поле, компенсирующее эту силу. Поперечное напряжение между краями пластинки (холловское напряжение) равно $U_{\perp} = E_y a$, где, согласно уравнению (2):

$$E_y = u_x B_z = \frac{j_x}{nq} B \quad (3)$$

Плотность тока, текущего через образец, равна $j_x = I/ah$, где I — полный ток, ah — поперечное сечение. Таким образом, для холловского напряжения имеем

$$U_{\perp} = \frac{B}{nqh} \cdot I = R_H \cdot \frac{B}{h} \cdot I, \quad (4)$$

где константу

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (5)$$

называют постоянной Холла. Знак постоянной Холла определяется знаком заряда носителей. Продольная напряжённость электрического поля равна

$$E_x = j_x / \sigma_0 \quad (6)$$

и падение напряжения $U_{\parallel} = E_x l$ вдоль пластинки определяется омическим сопротивлением образца $R_0 = l/(\sigma_0 ah)$:

$$U_{\parallel} = IR_0 \quad (7)$$

3. Автоматизация

Методика существующей работы

Схема представлена на рис. 3. Работа состояла из 4 частей:

Калибровка электромагнита: здесь определяется зависимость магнитной индукции в зазоре электромагнита от тока через магнит.

Измерение ЭДС Холла – определяется разность потенциалов на образце при различных значениях силы тока через электромагнит и образец.

Определение знака носителей – делаются выводы о характере проводимости по направлениям тока.

Измерение удельной проводимости – на образец подается небольшое напряжение, измеряется ток через него.

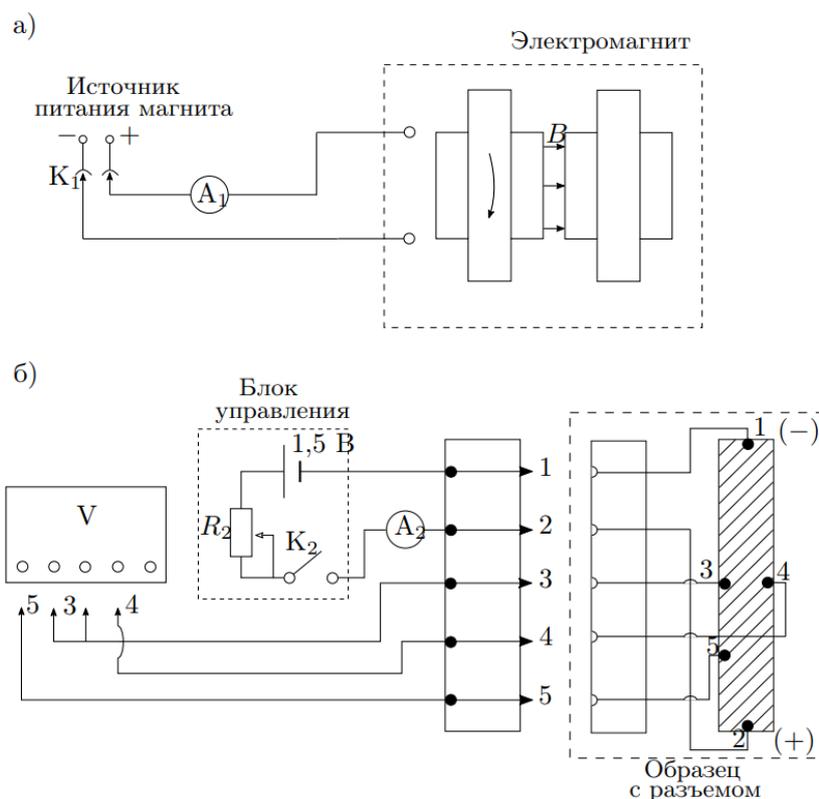


Рис. 3: Схема лабораторной работы для исследования эффекта Холла

Проблемы у существующей работы

У данной работы есть недостатки, основные содержатся в первых двух частях работы.

Градуировка электромагнита. Каждое измерение необходимо записать в лабораторный журнал. Это достаточно трудоемко, поэтому получается малое количество. Из-за этого у градуировочных коэффициентов возникают высокие погрешности.

Измерение ЭДС Холла. Измерение тока через образец реализовано с помощью аналогового амперметра с высокой погрешностью. Также невозможно регулировать изменение тока через образец, так как осуществляется при помощи реостата без шкалы. И опять же малое количество измерений из-за высокой трудоемкости.

Обновленный вариант

Схема обновленной работы представлена на рис. 4. Изменения на схеме выделены цветом: все, возможные для подключения, приборы соединены с компьютером. Связь с ними осуществляется при помощи USB-портов. Данные с приборов сохраняются в файлы. Каждая из частей лабораторной представлена в виде отдельного окна в программном обеспечении. Добавлена часть с автоматическим построением графиков и вычислением постоянных образца. Заменены некоторые приборы: аналоговый амперметр на цифровой, батарейка с реостатом без шкалы на программируемый источник питания.

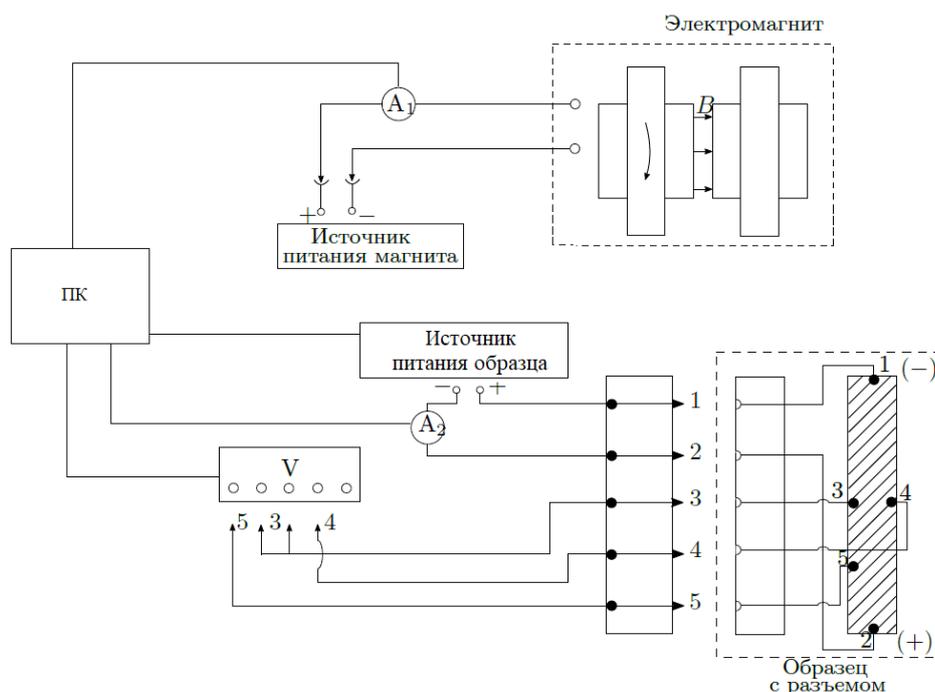


Рис. 4: Обновленная схема лабораторной работы для исследования эффекта Холла

Кроме схемы установки изменения видны и на фотографиях (рис. 5, 6).

У обновленного варианта есть свои преимущества:

- 1) Автоматическое получение данных понижает трудоемкость измерений и позволяет сделать большее их число. Из-за этого повышается точность постоянных образца.
- 2) Также аналоговый амперметр заменен более точным цифровым и добавлен источник питания образца с возможностью регулировки тока.
- 3) Есть автоматический контроль чрезмерно больших токов через образец, что предотвращает его повреждение.
- 4) Появилась возможность сделать выводы о работе сразу из-за компьютерной обработки результатов.

Результаты автоматизации

Лабораторная работа была выполнена на исходной установке и на автоматизированной. Результаты в виде зависимости ЭДС Холла от тока через образец представлены на рис. 7 и рис. 8. Изменения заметны. Во-первых, количество точек значительно выросло: с 50 до 200, то есть в 4 раза. Во-вторых, погрешности отдельных точек уменьшились: только за счет смены амперметра в 300 раз. В-третьих, погрешность коэффициента наклона прямой уменьшилась в более чем 3 раза (с 11 % до 3%).

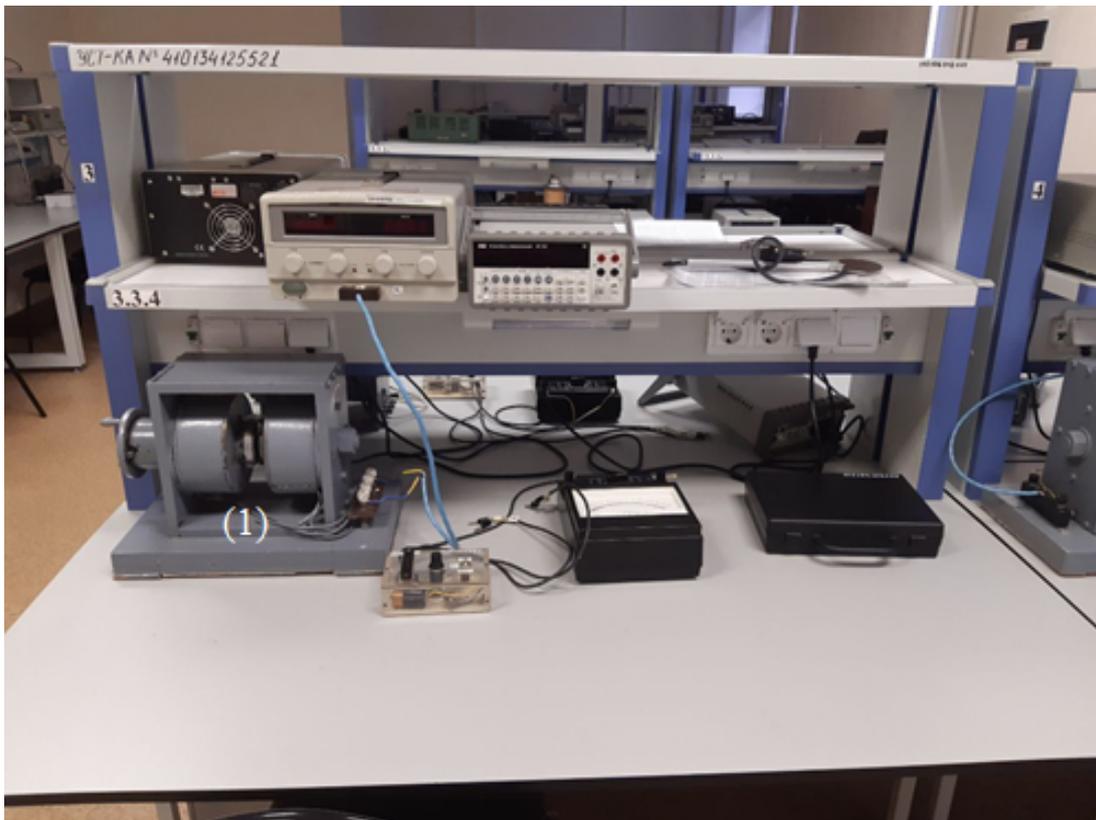


Рис. 5: Фотография установки по исследованию эффекта Холла, исходный вариант)

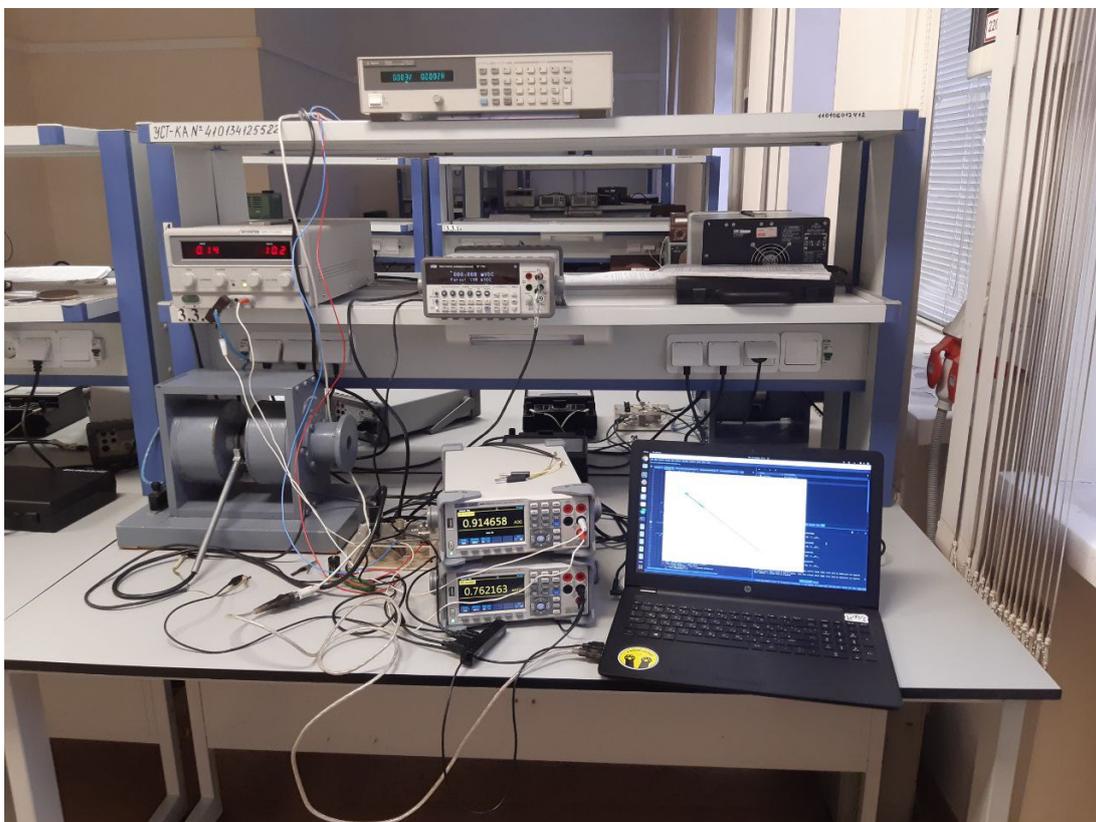


Рис. 6: Фотография установки по исследованию эффекта Холла, обновленный вариант)

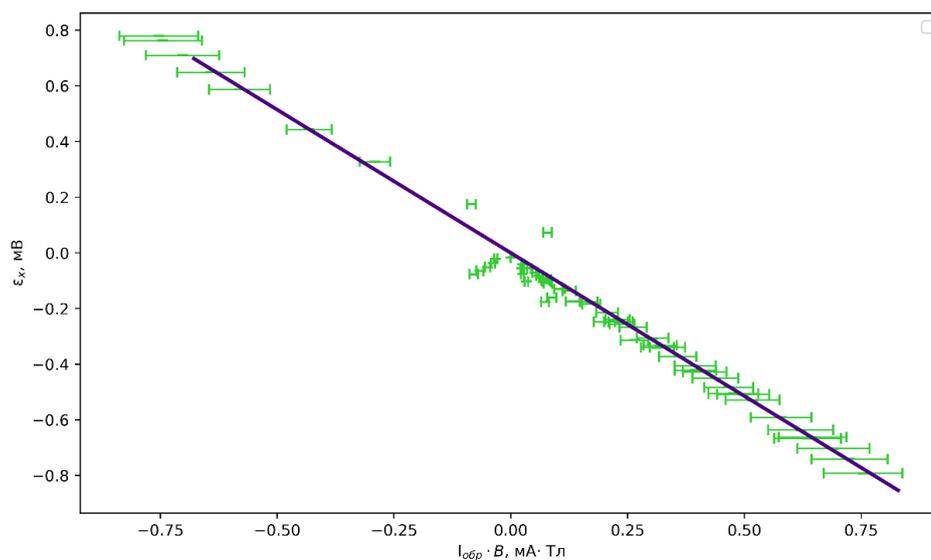


Рис. 7: Зависимость ЭДС Холла от тока через образец и магнитной индукции в исходном варианте работы

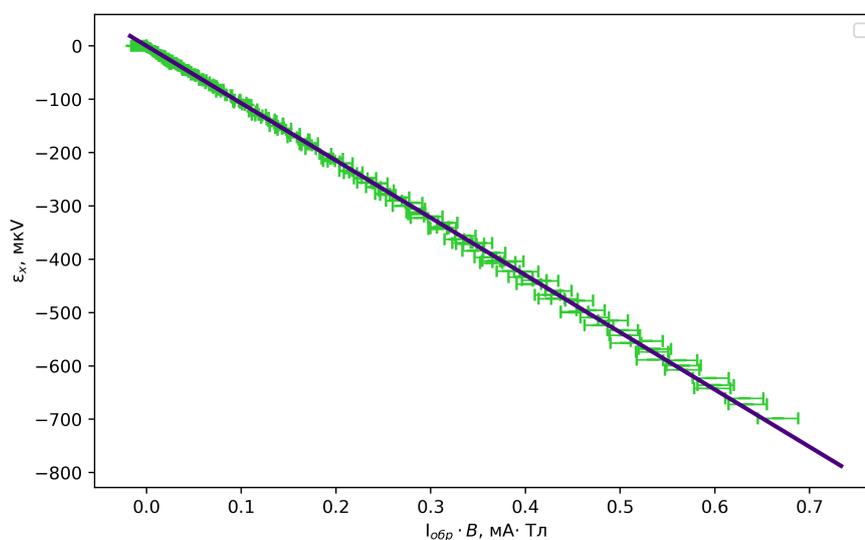


Рис. 8: Зависимость ЭДС Холла от тока через образец и магнитной индукции в обновленном варианте работы

Новое качество

Однако в процессе измерений было обнаружено, что зависимость магнитного поля в электромагните от тока через него не линейна (рис. 9).

Но из теоремы о циркуляции магнитного поля (в системе СГС):

$$\oint_L H \cdot dl = \frac{4\pi}{c} J \quad (8)$$

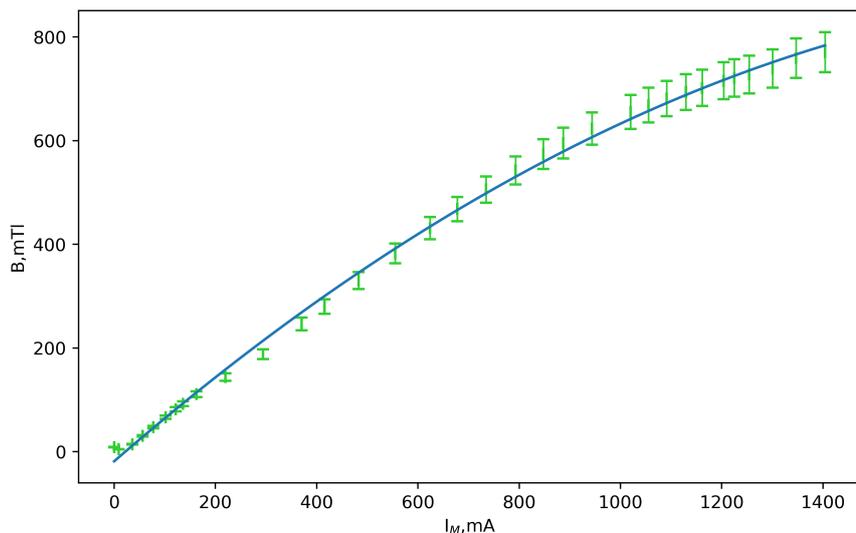


Рис. 9: Зависимость магнитной индукции в зазоре электромагнита от тока через него

Видно, что ток и напряженность магнитного поля связаны прямой пропорциональностью. То есть есть нелинейная зависимость B от H в электромагните.

Существуют вещества трех типов: пара-, диа- и ферромагнетики. Однако для первых двух зависимость B от H линейна. Из чего следует, что электромагнит создан из ферромагнитного материала (таковым является, например, железо).

Теперь интересно сравнить полученную зависимость с теоретической (в форме графика на рис. 10). Они, как и ожидалось, подобны друг другу, что подтверждает материал электромагнита.

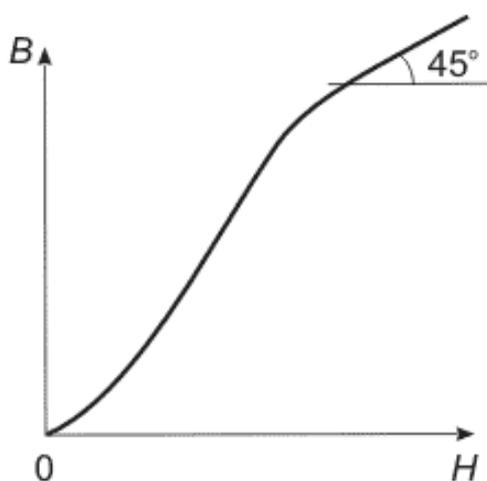


Рис. 10: Теоретическая зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля для ферромагнетика

4. Проблемы

Неавтоматизированные части

На текущий момент работа не является полностью автоматизированной. Это не получилось в данном семестре, так как не было высоковольтного источника питания и измерителя магнитной индукции с возможностью программирования. Еще есть проблема с подключением в виде коробки (рис. 11). Но изменить ее было невозможным, так как установку каждый раз необходимо было возвращать в исходное состояние.

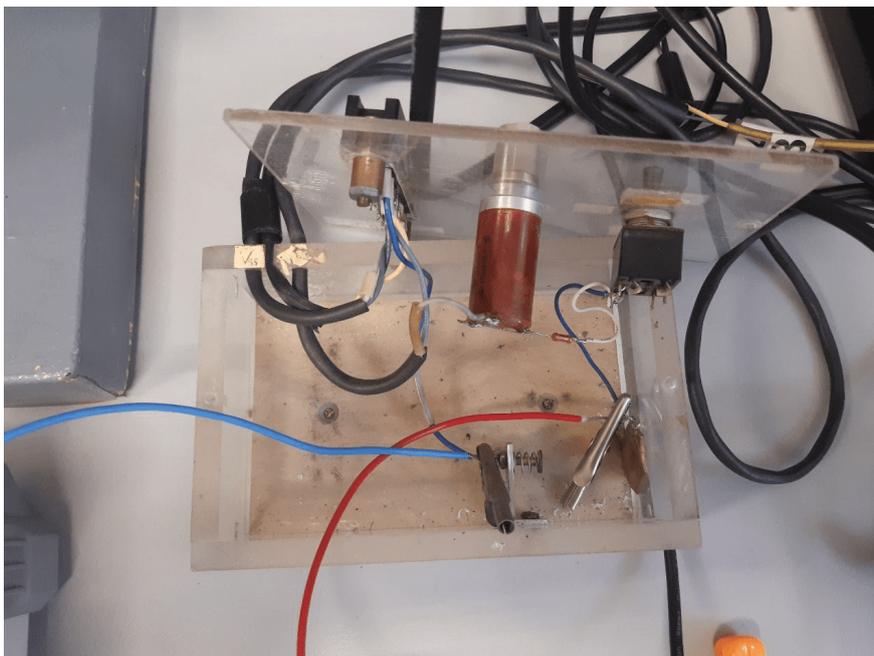


Рис. 11: Блок управления лабораторной работой

Неудавшиеся измерения

Были предприняты попытки обнаружить эффект Холла в металлах, используя то же оборудование. Однако в металлах постоянная Холла $R_H \approx 10^{-10}$, толщина образца порядка сотых долей миллиметра, пропускаемый допустимый ток около 1 мА, магнитная индукция около 1 Тл. Поэтому (из формулы 4) измеряемое напряжение было бы порядка 10^{-9} В, предел вольтметра при этом - десятые доли мкВ. Поэтому измерения не привели ни к чему хорошему.

5. Выводы

1. Получение данных напрямую с приборов увеличило скорость работы
2. Автоматизация и замена аналоговых приборов сделали работу существенно точнее
3. Благодаря автоматизации удалось достаточно быстро получить зависимость магнитной индукции от тока в электромагните, сделать вывод о ферромагнетизме материала.
4. Однако есть и проблемы, но их решение существует.