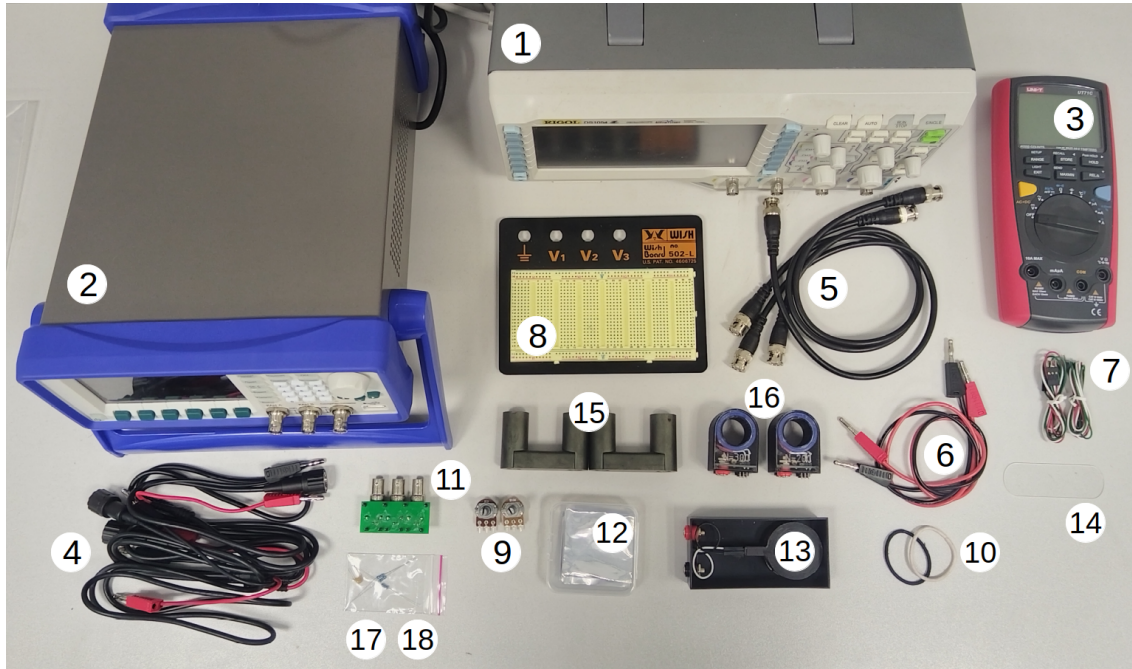


Road to IPhO

Ферритовый сердечник и трансформатор

Оборудование



1. Осциллограф
2. Генератор переменного сигнала
3. Цифровой мультиметр
4. Провода BNC-банан
5. Провода BNC-BNC
6. Провода банан-банан
7. Провод DuPont папа-мама тройной
8. Макетная плата
9. Потенциометры (1 кОм и 10 кОм)
10. Две резинки
11. Тройной переходник BNC-плата
12. Кусочки фольги толщины 50 мкм, 100 мкм, 200 мкм, 300 мкм
13. Блок с встроенной катушкой датчика
14. Пластиковая прокладка
15. Два ферритовых сердечника
16. Катушки **A** с количеством витков $N_A = 300 \pm 1$ и **B** с $N_B = 200 \pm 1$
17. Конденсатор номиналом (1.0 ± 0.1) мкФ
18. Резисторы номиналом (10.0 ± 0.1) Ом, (100 ± 1) Ом, (51 ± 1) кОм

Указание 1. Во всей работе сигнал генератора синусоидальный с удвоенной амплитудой $2U_0 = 12$ В (учтите, что генератор показывает именно удвоенную амплитуду) и частотой $f_0 = 10$ кГц, если не сказано иное.

Указание 2. Потенциометры используйте только в пунктах **B2-B4**.

Road to IPhO

Ферриты – это соединения оксида железа Fe_2O_3 с более основными оксидами других металлов, являющиеся **ферримагнетиками**. Ферриты широко применяются в качестве магнитных материалов в радиоэлектронике, радиотехнике и вычислительной технике, поскольку сочетают высокую магнитную восприимчивость ($\chi \gg 1$) с полупроводниковыми или диэлектрическими свойствами. Феррит при нормальных условиях имеет низкую электропроводность. Поэтому потерями, связанными с наличием вихревых токов в ферритовых сердечниках, можно пренебречь, если не оговорено иное. Осторожно обращайтесь с ферритовыми сердечниками, **они хрупкие!**

Часть А. Экранирование магнитных полей вихревыми токами (3.8 балла)

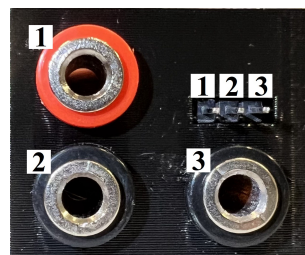
Как известно, переменные магнитные поля вызывают в проводниках вихревые токи. В свою очередь, вихревые токи порождают противодействующие поля. В сверхпроводниках вихревые токи полностью выталкивают магнитное поле наружу. Обычные металлы не обладают подобным свойством из-за конечной проводимости и потому менее эффективны в экранировании магнитных полей.

Для описания экранирования магнитных полей с помощью алюминиевой фольги примите следующую модель

$$B = B_0 e^{-\alpha d},$$

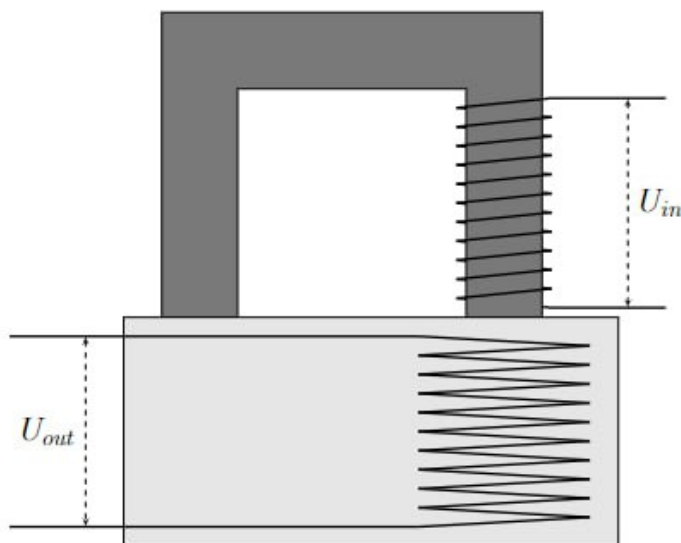
где B_0 – магнитное поле в отсутствии фольги, B – величина магнитного поля, прошедшего через фольгу, α – постоянная затухания, d – толщина фольги.

Соответствие между выводами типа «банан» и пинами показано на рисунке. Между выводами 1 и 2 находится сама катушка, между выводами 2 и 3 – последовательно соединённый с ней резистор. Вместо него вы также можете использовать резисторы (18).



A0 Измерьте сопротивления катушек **A** и **B** (r_A и r_B соответственно), а также сопротивления последовательно соединённых с ними резисторов. Все значения должны лежать в диапазоне до 15 Ом. **0.0**

Указание 3. В дальнейших пунктах омическим сопротивлением катушек можно пренебречь, если не указано иное. Наденьте на ферритовый сердечник катушку **A** (как показано на рисунке) и положите его ножками вниз на блок таким образом, чтобы катушка **A** находилась непосредственно над встроенной в платформу катушкой датчика. Закрепите сердечник на блоке с помощью резинок.



A1 Проведите измерения для проверки приведённой выше модели экранирования магнитных полей при частоте $f = 10$ кГц. Постройте линеаризованный график и найдите коэффициент затухания α для данной частоты. Фольгу необходимо располагать между катушкой **A** и катушкой датчика. **0.6**

Road to IPhO

A2 Определите коэффициент затухания α для нескольких частот в диапазоне 5 – 25 кГц.

2.0

A3 Постройте график зависимости α от частоты.

1.2

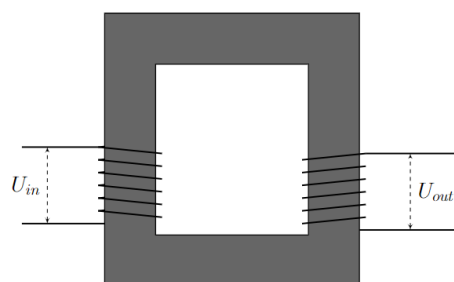
Часть В. Исследование трансформатора (4.8 балла)

Трансформатор представляет собой несколько проводочных обмоток, намотанных на общий сердечник (магнитопровод), сделанный из материала с магнитной проницаемостью $\mu \gg 1$, где μ определяется выражением

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H},$$

где $\vec{B}$ – вектор индукции магнитного поля, $\vec{H}$ – вектор напряжённости магнитного поля. Обмотку, подключаемую к источнику тока, называют первичной, а другую, подключаемую к нагрузке, – вторичной. В этой части считайте катушку **A** первичной обмоткой, а катушку **B** – вторичной. Ток в первичной обмотке создает поток, который в силу свойств сердечника практически не рассеивается вдоль магнитопровода. Этот поток индуцирует ток во вторичной обмотке. Трансформаторы обычно используют, чтобы увеличить или уменьшить амплитуду напряжения и гальванически разделить электрические цепи входа и выхода (т.е. передать сигнал с одного контура на другой без утечки тока).

Расположите два U-образных ферритовых сердечника с двумя катушками (как показано на рисунке) и скрепите их резинками. Подайте с помощью генератора синусоидальный сигнал $U_g(t) = U_0 \sin 2\pi f_0 t$ с частотой f_0 на первичную катушку.



Одной из характеристик трансформатора является коэффициент трансформации $m = \frac{U_{out,0}}{U_{in,0}}$, где $U_{in,0}$ и $U_{out,0}$ – амплитуды напряжений на первичной и вторичной катушках соответственно.

B1 Экспериментально определите m . Нарисуйте схемы измерений, необходимых для получения численного значения этой величины. **0.3**

Теперь замкнём вторичную катушку на реостат. Сопротивление реостата обозначим R . Введём $P_{пол}$ – усреднённую полезную мощность, выделяющуюся на реостате, и P_0 – усреднённую по времени мощность генератора. Работайте на частоте генератора $f_1 = 200$ Гц.

B2 Снимите зависимость $P_{пол}$ и P_0 от амплитуды тока во вторичной катушке $I_{B,0}$.

1.3

КПД трансформатора η определяется как $\eta = \frac{P_{пол}}{P_0}$.

B3 Постройте график зависимости $\eta(I_{B,0})$. Укажите максимальное КПД η_{max} и при каком $I_{B,0}^{max}$ оно достигается. **1.2**

В пункте **B4** следует учесть омическое сопротивление катушек. Проанализируем различные источники потерь. Отдаваемая в трансформатор мощность P_0 «раскладывается» на полезную мощность $P_{пол}$, иные джоулевые потери в катушках и резисторах $P_{Дж}$ и потери в сердечнике $P_{серд}$.

$$P_0 = P_{пол} + P_{Дж} + P_{серд}$$

B4 Получите зависимости относительного вклада каждого источника потерь $\frac{P_{Дж}}{P_0}$ и $\frac{P_{серд}}{P_0}$ от амплитуды тока во вторичной катушке $I_{B,0}$. Постройте их графики. **2.0**

Road to IPhO

Часть С. Катушки на сердечнике (6.4 балла)

Одна катушка Для начала рассмотрим сердечник с одной катушкой, через которую течёт ток I . Магнитный поток Φ , который ток создаёт в ферритовом сердечнике внутри катушки, пропорционален току I и числу витков N . Кроме того, поток зависит от геометрического фактора g , который определяется размером и формой сердечника, и магнитной проницаемости μ , которая описывает магнитные свойства материала сердечника. Таким образом, магнитный поток Φ задаётся формулой

$$\Phi = \mu\mu_0 g N I.$$

Считайте, что на катушку подаётся сигнал с угловой частотой ω . Считайте, что g для катушек **A** и **B** одинаков.

C1 Получите уравнение, связывающее между собой амплитуды тока и напряжения в катушке.

0.1

Две катушки Теперь рассмотрим сердечник с двумя катушками. Ферритовый сердечник можно использовать для связи катушек **A** и **B** между собой. В идеальном сердечнике магнитный поток будет одинаковым для всех поперечных сечений, но из-за рассеяния потока в реальных сердечниках поток поля, создаваемого катушкой **A**, через катушку **A** и поток этого поля через катушку **B** связаны следующим образом:

$$\Phi_B = k\Phi_A,$$

где $k < 1$ – так называемый коэффициент связи. Аналогично ток в катушке **B**, создаст поток Φ'_B через катушку **B** и

$$\Phi'_A = k\Phi'_B$$

через катушку **A**. Экспериментально проверено, что коэффициент k не зависит от того, какая катушка взята в качестве первичной. Пусть катушка **A** является первичной катушкой, т.е. подключенной к генератору с синусоидальным напряжением $U_g(t) = U_0 \sin 2\pi f_0 t$ (напомним, $N_A = 300 \pm 1$). Рассмотрим ситуацию, когда ток через катушку **B** не протекает. **Во всех пунктах этой части (кроме C13) схема расположения катушек на сердечнике такая же, как в части B.**

C2 В этом случае получите выражения для ЭДС индукции $\mathcal{E}_A(t)$ и $\mathcal{E}_B(t)$ в катушках **A** и **B** соответственно. Ответ выразите через N_A , N_B , k , $U_g(t)$. Ток в первичной катушке считайте положительным, если он течет от «плюса» источника к «минусу». **0.1**

Пусть теперь через катушку **B** протекает ток $I_B(t)$.

C3 Получите выражение для производной тока в катушке **A** $\frac{dI_A(t)}{dt}$. Ответ выразите через μ , μ_0 , g , N_A , N_B , k , $U_g(t)$, $I_B(t)$. Считайте токи I_A и I_B одного знака, если создаваемые ими потоки складываются. **0.3**

Общепринятым способом описания зависимости между током и ЭДС индукции в катушке является определение собственной индуктивности катушки L следующим образом:

$$\mathcal{E}(t) = -L \frac{dI(t)}{dt}$$

C4 Получите теоретические выражения для собственных индуктивностей L_A и L_B . Ответ выразите через μ , μ_0 , g , N_A , N_B . **0.6**

C5 Экспериментально определите L_A , L_B , k . Нарисуйте схемы измерений, необходимых для получения численных значений этих величин. **0.8**

C6 Покажите, что пренебрежение внутренним сопротивлением катушки оправдано.

0.3

При коротком замыкании вторичной катушки ток в первичной изменится. Обозначим его $I_P(t)$.

Road to IPhO

C7 Получите в явном виде выражение для $I_P(t)$ через f_0 , L_A , k , $U_g(t)$ и найдите численное значение его амплитуды $I_{P,0}$. **0.6**

C8 Экспериментально определите $I_{P,0}$. **0.6**

Катушки **A** и **B** могут быть включены в цепь последовательно двумя различными способами: два создаваемых потока либо суммируются, либо вычитаются друг из друга.

C9 Выразите собственную индуктивность последовательно соединенных катушек L_{A+B} в случае, когда потоки от разных катушек суммируются. Ответ выразите через L_A , L_B , k . **0.2**

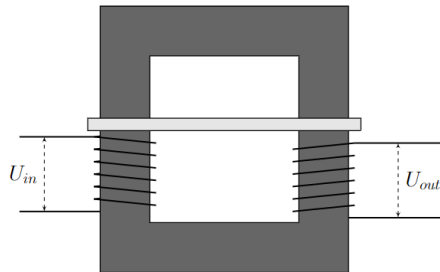
Соедините катушки **A** и **B** последовательно так, чтобы создаваемые ими потоки суммировались.

C10 Экспериментально определите L_{A+B} . **0.3**

C11 Используя экспериментальные значения L_A , L_B , L_{A+B} , найдите коэффициент связи k . Сравните полученное значение с полученным в пункте **C5**. **0.2**

C12 Проведите измерение амплитуды ЭДС индукции на катушках $\mathcal{E}_{A,0}$ и $\mathcal{E}_{B,0}$, когда направления создаваемых потоков противоположны и найдите отношение $\frac{\mathcal{E}_{A,0}}{\mathcal{E}_{B,0}}$. Получите теоретическое выражение для $\frac{\mathcal{E}_{A,0}}{\mathcal{E}_{B,0}}$. Ответ выразите через k , N_A , N_B . **0.3**

Тонкая пластиковая прокладка, вставленная между двумя сердечниками, значительно снижает индуктивность катушки. Предположим, что $\mu_{\text{пл}} = 1$ для пластиковой прокладки. Толщина прокладки составляет (1.20 ± 0.02) мм. Считайте, что наличие пластиковой прокладки слабо влияет на картину магнитных линий, а их характерная длина внутри замкнутых друг на друга ферритовых сердечников равна (24 ± 1) см.

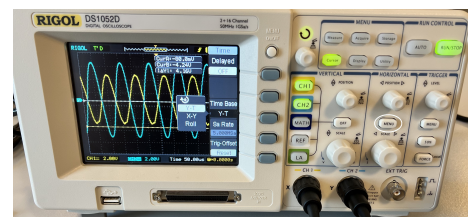


C13 Определите относительную магнитную проницаемость μ ферритового материала. Нарисуйте схемы измерений, обозначив на них линии индукции магнитного поля. **2.0**

Часть D. Исследование гистерезиса (5.0 балла)

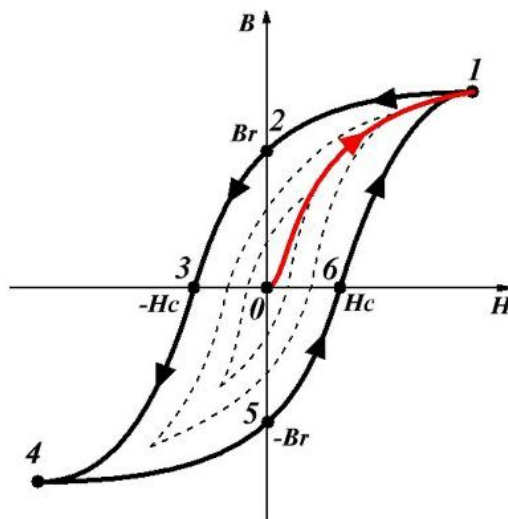
Внимание! В этой части вам понадобится режим X-Y на осциллографе. Для перехода в этот режим нажмите кнопку MENU, выберите Time Base и режим X-Y (см. рисунок справа).

Гистерезис – свойство систем, отклик которых на приложенное к ним воздействие зависит не только от их текущего состояния, но и от их «предыстории». Например, если растянуть резиновый шнур, а затем снова вернуть его в нерастянутое состояние, его длина до и после растяжения будет различной. Это называется упругим гистерезисом. Подобное явление наблюдается и в случае с полем в веществе и называется магнитным гистерезисом. Оказывается, если периодически изменять величину напряжённости поля H , график зависимости $B(H)$ не будет проходить через точку $(0, 0)$. На рисунке жирным выделена зависимость $B(H)$ для некоторой фиксированной амплитуды H . Когда H увеличивается, B изменяется по траектории 4 – 5 – 6 – 1, когда



Road to IPhO

уменьшается – по траектории 1 – 2 – 3 – 4. Такой цикл называется **петлёй гистерезиса**. Пунктирными линиями показаны петли гистерезиса для различных амплитуд H . Если соединить крайние точки для всех петель, получится некоторая кривая (кривая 0 – 1 на рисунке), называемая **кривой намагничивания**, она описывает связь между B и H для размагниченного образца, впервые помещаемого во внешнее поле (линия 0 – 1). В данной части задачи нам потребуется получить кривую намагничивания феррита и с помощью неё исследовать другие магнитные свойства этого материала.



В этой части используйте две катушки на ферритмагнитном сердечнике (подавайте сигнал на катушку **A** и снимайте сигнал с катушки **B**). Используйте максимально возможное значение амплитуды U_{in} , если не оговорено иное. Частоту подаваемого синусоидального сигнала можно менять, но она должна лежать в диапазоне [40; 10000] Гц. Чтобы получить на экране осциллографа петлю гистерезиса, сигналы на двух каналах осциллографа $U_1(t)$ и $U_2(t)$ должны быть пропорциональны H и B соответственно. По теореме о циркуляции

$$H \sim I$$

где I – ток через первичную катушку. Его можно измерить с помощью последовательно подключенного к первичной катушке резистора. Напряжение на вторичной катушке U по закону Фарадея

$$U \sim \frac{dB}{dt}$$

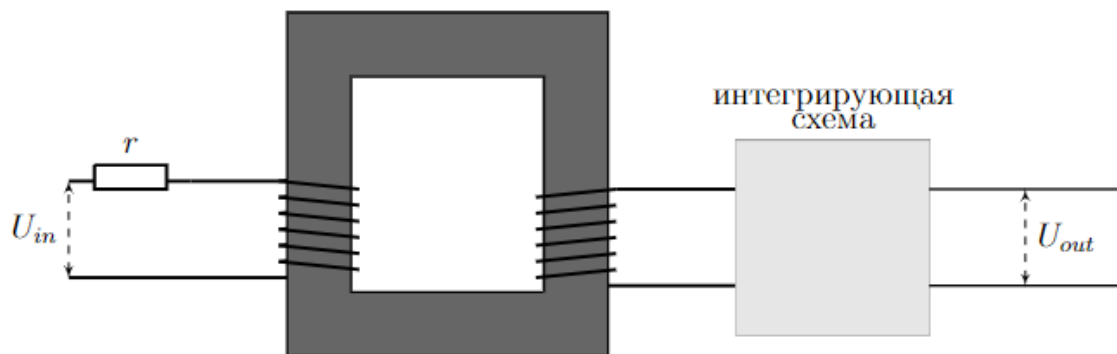
Чтобы получить $B(t)$, нужно подать напряжение со вторичной катушки U на интегрирующую схему, напряжение на выходе которой

$$U_2 \sim \int U dt \sim B$$

Считайте сечение сердечника круглым с диаметром $d = (20.1 \pm 0.1)$ мм. Во время измерений не допускайте сильных вибраций сердечников (для этого используйте резинки и дополнительно придерживайте их рукой). **Примечание:** если сердечники начинают сильно вибрировать, заново поставьте их друг на друга и прижмите сверху.

- | | | |
|-----------|--|------------|
| D1 | Соберите интегрирующую схему для рисунка выше, сигнал на выходе которой пропорционален $B(t)$. Подберите её параметры так, чтобы током через вторичную катушку можно было пренебречь. Зарисуйте собранную схему в листах ответов и укажите подобранные параметры. | 1.0 |
| D2 | С помощью осциллографа получите петли гистерезиса при разных частотах и зарисуйте полученные зависимости. | 0.5 |

Road to IPhO



Обозначим частоту, при которой гистерезис виден наилучшим образом, f_b . В следующем пункте вы можете регулировать напряжение U_{in} .

D3 Запишите f_b в лист ответов. При частоте f_b получите кривую намагничивания $B(H)$, регулируя напряжение U_{in} , и постройте её. **2.0**

Введем понятие нормальной относительной магнитной проницаемости $\mu_n = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H}$.

D4 Постройте график $\mu_n(H)$ для зависимости из прошлого пункта. Укажите характерные точки, если они есть. **1.5**