

УДК 537.8

EDN: HGFVZW

© Е. Г. Апушкинский, Е. В. Гольдберг, В. А. Кожевников, 2026

## УЧЕБНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СТЕНД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНЕТИКА

Предложено техническое решение и создан лабораторно-измерительный стенд по определению основных параметров ферромагнитного материала (индукции насыщения  $B_s$ , остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_c$ ). Данный стенд используется как лабораторная учебная установка для проведения работ студентами при изучении курса физики, может использоваться как технологический комплекс для контроля ферромагнитных материалов и изделий из них, а также как установка для проведения научных работ по созданию новейших цифровых измерителей магнитного поля. Исследуемый образец должен представлять собой ферритовый тороидальный (кольцевой) или просто стержневой сердечник. Стенд может работать в режиме удаленного управления.

**Ключевые слова:** ферромагнитные материалы, учебное лабораторное оборудование, дистанционное управление

### ВВЕДЕНИЕ

Разработанный стенд предназначен для снятия основных характеристик ферромагнетика, а именно:

$B_r$  — остаточная индукция, в системе единиц СИ измеряется в Тл;

$H_c$  — магнитная коэрцитивная сила, в системе единиц СИ измеряется в А/м;

$B_s$  — индукция насыщения, в системе единиц СИ измеряется в Тл;

$H_s$  — напряженность магнитного поля, соответствующая насыщению, в системе единиц СИ измеряется в А/м;

$\mu_{\max}$  — максимальная магнитная проницаемость.

Физический смысл этих величин дается в любом университетском курсе физики, например, [1, 2]. Как известно, для ферромагнетиков зависимость между  $B$  и  $H$  будет нелинейной. Кроме нелинейной зависимости между величинами  $H$  и  $B$ , для ферромагнетиков характерно также наличие свойства гистерезиса (от греческого "гистерезис" — запаздывание), которое выражается в том, что при изменениях напряженности магнитного поля  $H$  значения индукции  $B$  магнитного поля "отстают" от  $H$ , в результате чего  $B$  определяется не только величиной  $H$  в данный момент, но и предшествующими значениями  $H$ , т.е. зависит от предыстории ферромагнетика. Гистерезис приводит к тому, что намагничивание ферромагнетика не является однозначной функцией  $H$ . При циклическом изменении величины

и направления напряженности внешнего поля  $H$ , действующего на ферромагнетик (например, по синусоидальному закону), зависимость  $B(H)$  изображается кривой, называемой петлей гистерезиса. Объяснение явления ферромагнетизма можно найти в классических трудах [3–5].

При внесении ферромагнетика в слабое переменное магнитное поле, не способное вызвать насыщение его намагниченности, получается петля, называемая частным циклом. Частных петель существует бесконечное множество, все они лежат внутри предельной петли гистерезиса. Вершины частных петель гистерезиса образуют основную кривую намагничивания, она близка к кривой первоначального намагничивания.

Отметим, что в связи с неоднозначностью зависимости  $B(H)$  понятие магнитной проницаемости применяется, как правило, к кривой первоначального намагничивания. Зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  от  $H$  может быть построена по этой кривой, поскольку, как следует из формулы, связывающей  $B$  и  $H$  [6]

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (1)$$

величина  $\mu$  пропорциональна тангенсу угла наклона кривой первоначального намагничивания. При росте  $H$  магнитная проницаемость достигает максимума  $\mu_{\max}$ , а затем при насыщении намагниченности быстро спадает, асимптотически приближаясь к единице  $\mu \sim dB / dH$ .

На данном стенде реализуется автоматическое получение петли гистерезиса. Проводится анализ экспериментально наблюдаемой петли и определяются основные характеристики ферромагнетика.

### ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Схема установки представлена на рис. 1, а на рис. 2 дана ее фотография. На первичную обмотку подают сигнал  $U_{in}$  от генератора синусоидального напряжения, частоту и амплитуду которого регулируют с помощью функциональных клавиш на панели генератора. Напряжение  $U_x$  с сопротивления  $R_1$  подается на вход  $X$ , а напряжение  $U_y$  конденсатора  $C$  — на вход  $Y$  осциллографа.

Исследуемый образец, используемый в установках для обучения студентов, представляет собой ферритовый тороидальный (кольцевой) сердечник  $T$  трансформатора прямоугольного попе-

речного сечения площадью  $S$ , на котором имеются две обмотки: первичная намагничивающая обмотка с числом витков  $n_1$  и вторичная измерительная обмотка с числом витков  $n_2$ . Для контроля съемных образцов и для исследований по подбору ферромагнетиков для магнитометров возможно использование специальных разрывных катушек.

Если отклонение луча на экране осциллографа по горизонтали составляет  $x$  делений, а по вертикали —  $y$  делений, то напряжения  $U_x$ ,  $U_y$ , поступающие на входы  $X$ ,  $Y$  осциллографа:

$$U_x = a_x x, \quad U_y = a_y y, \quad (2)$$

где  $a_x$  и  $a_y$  — коэффициенты горизонтального и вертикального отклонения луча соответственно, т.е. цены делений шкалы экрана по горизонтали и вертикали.

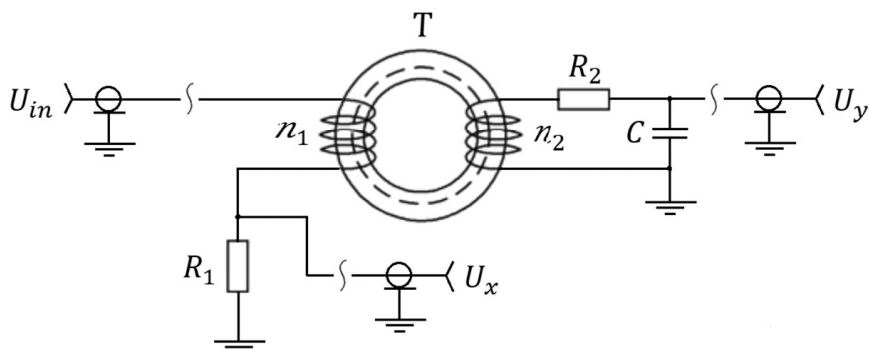


Рис. 1. Схема установки для получения динамической петли гистерезиса

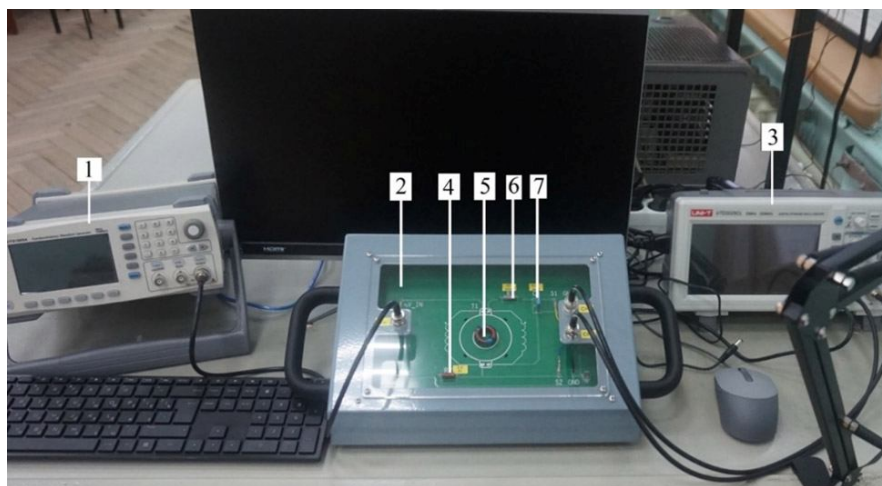


Рис. 2. Фотография установки для получения динамической петли гистерезиса. 1 — цифровой генератор; 2 — модуль образца с интегрирующей цепочкой; 3 — цифровой осциллограф; 4 — резистор в цепи первичной обмотки; 5 — ферритовый тороидальный сердечник; 6 — резистор интегрирующей цепочки; 7 — конденсатор интегрирующей цепочки

Покажем, что в данной схеме напряжение  $U_x$  пропорционально напряженности  $H$  магнитного поля, а напряжение  $U_y$  пропорционально индукции  $B$  магнитного поля в сердечнике. Ток  $I_1$  в первичной обмотке возбуждает в тороидальном сердечнике магнитное поле напряженностью

$$H = \frac{n_1}{l} I_1. \quad (3)$$

Формула (3) справедлива в том случае, когда сопротивление  $R_2$  выбрано достаточно большим по сравнению с  $R_1$  и влиянием тока вторичной обмотки на магнитный поток в сердечнике можно пренебречь. Здесь  $l = 2\pi r$  — длина окружности сердечника по средней линии (средняя длина силовой линии магнитного поля в сердечнике),  $r$  — средний радиус тороида.

Последовательно с первичной обмоткой подключен резистор  $R_1$ , падение напряжения на котором равно  $U_1 = I_1 R_1$ , или с учетом (3)

$$U_1 = \frac{R_1 l}{n_1} H, \quad (4)$$

т.е. пропорционально напряженности магнитного поля  $H$ . Это напряжение подается на вход  $X$  усилителя горизонтальной развертки осциллографа  $U_x = U_1$ .

По горизонтальному отклонению  $x$  луча легко вычислить напряженность, учитывая (2) и преобразуя (4) к следующему виду

$$H = m_x x, \quad (5)$$

где

$$m_x = \frac{n_1 a_x}{l R_1} \quad (6)$$

есть масштаб оси  $X$ , который позволяет определить напряженность магнитного поля  $H$  по изображению на экране осциллографа.

Во вторичной обмотке индуцируется ЭДС (в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея), пропорциональная скорости изменения индукции магнитного поля в образце, модуль которой равен:

$$\varepsilon = n_2 \frac{d\Phi}{dt} = n_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (7)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения сердечника,  $\Phi = BS$  — магнитный поток через каждый виток. Из (7) следует, что для нахождения индукции  $B$  нужно проинтегрировать по времени ЭДС во вторичной обмотке испытуемого образца:

$$B = \frac{1}{n_2 S} \int \varepsilon dt. \quad (8)$$

Для осуществления такой операции в схеме установки применяется простейшая интегрирующая  $RC$ -цепь. Она состоит из последовательно включенных резистора сопротивлением  $R_2$  и конденсатора емкостью  $C$ .

Напряжение на всей  $RC$ -цепочке —  $\varepsilon$ ; выходным сигналом служит напряжение на конденсаторе  $U_y = U_c$ . Этот сигнал с конденсатора подается на вход усилителя вертикальной развертки осциллографа (см. рис. 1). Интегрирование будет достигнуто при условии, что  $U_y \ll U_{вх}$ , (т.е.  $U_c \ll \varepsilon$ ), которое выполняется в том случае, если активное сопротивление  $R_2$  много больше сопротивления конденсатора  $C$  переменному току, т.е.  $R_2 \gg 1/(\omega C)$  (в данной работе требуемое неравенство выполняется). В этом случае ток вторичной обмотки определяется лишь величиной сопротивления  $R_2$ :

$$I_2 \approx \frac{\varepsilon}{R_2}. \quad (9)$$

Напряжение на конденсаторе определяется его зарядом  $U_c = q / C$ , а заряд  $q$  можно вычислить интегрированием по времени силы тока  $I_2$ . Таким образом, с учетом (7):

$$U_y = U_c = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{n_2 S}{C R_2} \int \frac{dB}{dt} dt = \frac{n_2 S}{C R_2} B, \quad (10)$$

что и требовалось доказать.

Учитывая, что вертикальное отклонение луча  $y$  пропорционально напряжению  $U_y$  (формула (2)), преобразуем (10) к виду:

$$B = m_y y, \quad (11)$$

где

$$m_y = \frac{R_2 C a_y}{S n_2} \quad (12)$$

масштаб оси  $Y$ , который позволяет по измеренному вертикальному отклонению луча  $y$  вычислить соответствующее значение индукции магнитного поля  $B$ .

При одновременной подаче на входы  $X$  и  $Y$  осциллографа переменных напряжений одинаковой частоты, одно из которых пропорционально напряженности поля в сердечнике трансформатора ( $U_x \sim H$ ), а другое — магнитной индукции ( $U_y \sim B$ ), на экране осциллографа будет воспроизводиться динамическая зависимость  $B(H)$ , т.е. петля гистерезиса.

### Характеристики стенда, используемого как учебная установка.

- Диапазон входного напряжения намагничивающей обмотки АС: 0–20 В.
- Частота входного напряжения для наблюдения гистерезиса: 3.7 кГц.
- Габаритные размеры (д × ш × в): 414 × 189 × 156 мм.
- Масса: 3.5 кг.
- Ферритовый сердечник 1: B64290-L638-X35 (материал T35 Mn-Zn, размеры d22 × d13 × 6 мм).
- Ферритовый сердечник 2: M6000HM (материал Ni-Zn, размеры d45 × d28 × 4 мм).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Для проведения испытаний стенда с ферритовым сердечником 2 в качестве измерительных приборов были использованы цифровой генератор UNIT UTG1005A и осциллограф UNIT UTD2025CL.

Получены следующие характеристики ферромагнитного материала:  $H_c = 3.6$  А/м;  $B_r = 48$  мТл;  $B_s = 200$  мТл;  $\mu_{\max} = 10\,000$ . Экспериментальный график зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля приведен на рис. 3.

### ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ В ДИСТАНЦИОННОМ РЕЖИМЕ

Для возможности работы дистанционно было написано соответствующее программное обеспечение.

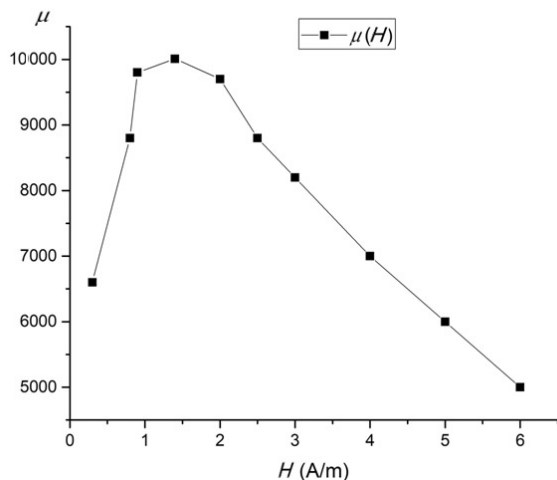


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

Для выполнения лабораторной работы в дистанционном режиме нужны приложение для видеоконференций и приложение для удаленного доступа и управления компьютерами (или приложение, в котором реализованы обе эти функции). В данном описании мы рассмотрим работу с Microsoft Teams.

Перед началом работы преподаватель (или лаборант) включает все приборы лабораторной установки, видеокамеру и компьютер, подсоединенный к установке. На этом компьютере запускаются MSTeams и программа удаленного управления лабораторной работы "Гистерезис ферромагнетика" (в дальнейшем эту программу для краткости будем называть "Hysteresis"). Интерфейс программы во многом повторяет интерфейс приборов лабораторной установки и позволяет полностью управлять ими с компьютера. В верхней левой части окна программы расположен интерфейс управления генератором, в правой верхней части находится окно изображения с видеокамеры, снимающей лабораторную установку в режиме реального времени, в нижней части расположен интерфейс управления осциллографом.

Управление осциллографом и генератором осуществляется в окне программы с помощью компьютерной мыши. Нажатие левой кнопки мыши (ЛКМ) по кнопке виртуального осциллографа или генератора в окне программы повторяет физическое нажатие на кнопку реального осциллографа или генератора. Стоит отметить, что после нажатия ЛКМ по любой из кнопок управления осциллографом, физическое управление реальным осциллографом блокируется (т.е. реальный осциллограф перестает реагировать на нажатие любой из кнопок на панели управления). Чтобы разблокировать физическое управление осциллографом, необходимо нажать ЛКМ на значок разблокировки (замочек) на виртуальном осциллографе в окне программы. Отличие панели управления виртуального генератора от панели управления физического генератора заключается в том, что многофункциональная ручка-переключатель и кнопки направлений со стрелками находятся в одной области виртуальной панели управления (в правом верхнем углу панели). Темный экран виртуального управления осциллографом или генератором в окне программы и перечеркнутый символ USB (у генератора этот символ USB находится в левом нижнем углу его панели, у осциллографа — в самом низу (примерно посередине) его панели) означает, что соединение осциллографа или генератора с компьютером не установлено (либо соответствующий прибор выключен, либо отсутствует USB-подключение между прибором и компьютером).

## ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Как известно, ферромагнетики (а ферриты их подкласс) много где используются в современной технике. Перечислим здесь ряд приложений для феррита Т35.

1. Магнитные головки для аналоговой звукозаписи (устаревшее, но исторически важное применение).

2. Дроссели с постоянным подмагничиванием (дроссели фильтров в силовой электронике).

3. Импульсные и широкополосные трансформаторы.

4. Антенны магнитной составляющей ЭМ-поля (радиоприем, измерения).

5. Магнитно-мягкие элементы датчиков (например, в феррозондах).

Остановимся более подробно на последнем приложении. Феррозонд — это активный датчик, который не измеряет поле напрямую, а преобразует его в электрический сигнал с помощью уникальных свойств феррита Т35. Высокая индукция насыщения и низкие гистерезисные потери позволяют эффективно и с малыми искажениями переводить сердечник в состояние насыщения переменным полем высокой частоты, что является принципом работы феррозонда. Именно сочетание низкой  $\mu$  и высокой  $B_s$  дает Т35 "крутую" нелинейную характеристику намагничивания, которая и является "двигателем" работы феррозонда. Конструкция такого феррозонда принципиально ничем не отличается от конструкции нашего стенда (только вместо кольца нужно использовать стержень). Принцип его работы можно назвать циклическим насыщением:

- ток в обмотке возбуждения создает в сердечнике сильное переменное поле  $H_{\sim \text{возб}}$ ;
- это поле настолько велико, что дважды за период (в положительном и отрицательном пике) переводит сердечник Т35 в состояние магнитного насыщения.

Это происходит даже без какого-либо внешнего поля. Допустим, мы хотим измерить слабое постоянное или низкочастотное поле (например, геомагнитное). Это поле  $H_{\text{внеш}}$  складывается с полем возбуждения  $H_{\sim \text{возб}}$ . Из-за нелинейности (прямоугольности петли) это сложение нарушает симметрию процесса перемагничивания. Насыщение теперь наступает не одновременно в положительной и отрицательной полуволнах. Если  $H_{\text{внеш}}$  сонаправлено с  $H_{\sim \text{возб}}$ , насыщение наступит раньше. Если направлено против — позже. Таким образом, слабое постоянное поле вызывает сдвиг во времени (фазовый сдвиг) моментов насыщения.

В результате в измерительной обмотке наводится ЭДС, пропорциональная скорости изменения индукции ( $dB/dt$ ). Сигнал в ней — это произ-

водная от искаженной кривой  $B(t)$ . Симметричная без внешнего поля кривая  $B(t)$  содержит в своем спектре только нечетные гармоники основной частоты возбуждения. При появлении  $H_{\text{внеш}}$  и нарушении симметрии в спектре сигнала резко появляется и возрастает четная гармоника, в первую очередь — вторая. Амплитуда этой второй гармоники прямо пропорциональна величине измеряемого поля  $H_{\text{внеш}}$ .

Определимся с тем, какие поля может измерять феррозонд на Т35. Феррозонд — инструмент для измерения вектора магнитной индукции, а конкретнее — его составляющей вдоль оси сердечника. По природе поля он может измерять такие виды полей:

Постоянные магнитные поля (DC). Основное применение:

- геомагнитное поле ( $\sim 50$  мкТл);
- поля постоянных магнитов;
- техногенные постоянные поля.

Низкочастотные переменные поля (AC) от долей Гц до нескольких кГц:

- поля от промышленных сетей (50/60 Гц);
- биомангнитные поля (сердца — 1–40 Гц, мозга — до 100 Гц).

По величине (диапазону измерений напряженности) феррозонд на Т35 особенно применим для слабых и сверхслабых полей:

- нижний предел: определяется собственным шумом и стабильностью схемы (от 0.01–0.1 нТл) для прецизионных лабораторных приборов;
- верхний предел: определяется линейностью отклика и в конечном счете — индукцией насыщения  $B_s$  Т35 (обычно до 0.1–1 мТл); для более сильных полей конструкцию модифицируют.

Укажем на некоторые конкретные области применения, где можно использовать наш стенд после его доработки под конкретную задачу.

1. Геофизика и разведка:
  - магниторазведка (поиск рудных тел, археологических объектов);
  - измерение параметров магнитного поля Земли (магнитометры обсерваторий);
  - морская и аэромагнитная съемка.
2. Космические исследования:
  - магнитометры на спутниках и космических зондах для изучения магнитных полей планет и солнечного ветра.
3. Научные исследования:
  - измерение слабых полей в физических экспериментах;
  - магнитокардиография и магнитоэнцефалография (в этих областях его в основном вытеснили SQUID, но феррозонды используются в более простых системах).

4. Неразрушающий контроль:  
○ обнаружение дефектов в ферромагнитных материалах по искажению магнитного поля.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья рассказывает о той работе, которая ведется на кафедре физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого по созданию современного физического практикума для будущих инженеров. Сообщается об одной из работ, которая отличается современными приложениями физических эффектов и явлений в технике. Установки укомплектованы цифровыми приборами и допускают их тиражирование, т.к. на них разработана конструкторская документация. История последних лет показала, что могут возникать обстоятельства, при которых студентам, не удастся попасть в лабораторию, поэтому нами предусмотрен режим дистанционного управления установками, который не является основным, но возможным. Понятно, что и в обычных условиях дистанционный режим может быть основным для малоподвижных студентов и студентов заочной формы обучения. Важно подчеркнуть, что речь идет о реальном эксперименте, проводимом студентами, а не о компьютерной симуляции. Таким образом, на базе опыта данной работы, может быть создана учебная лаборатория, соответствующая духу настоящего времени, в которой студенты и преподаватели могут, помимо обучения, работать над созданием приборов, востребованных во многих областях современной техники.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Иванов В.К.* Физика. Электромагнетизм: учеб. пособие. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 265 с.
2. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики : учеб. пособие для вузов в 5 т. Т. 3. Электричество. М.: Физматлит, Изд-во МФТИ, 2004. 656 с.
3. *Вонсовский С.В.* Магнетизм: магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримагнетиков. М.: Наука, 1971. 1032 с.
4. *Уайт Р.* Квантовая теория магнетизма. М.: Мир, 1985. 303 с.
5. *Киттель Ч.* Квантовая теория твердых тел. М.: Наука, 1967. 491 с.
6. *Апушкинский Е.Г. и др.* Физика. Электромагнетизм. Практикум: учебное пособие СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. 106 с.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

Контакты: *Гольдберг Екатерина Владимировна*,  
goldberg\_ev@spbstu.ru

Материал поступил в редакцию 09.04.2026

# EDUCATIONAL AND TECHNICAL STAND FOR DETERMINING THE MAGNETIC CHARACTERISTICS OF A FERROMAGNET

**E. G. Apushkinskiy, E. V. Goldberg, V. A. Kozhevnikov**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

A technical solution has been proposed, and a laboratory-measurement rig has been created for determining the key parameters of ferromagnetic materials (saturation induction  $B_s$ , residual induction  $B_r$ , and coercivity  $H_c$ ). This rig is used as a laboratory training facility for students studying physics, as a technological complex for testing ferromagnetic materials and products made from them, and as a rig for conducting research on the development of cutting-edge digital magnetic field meters. The test sample should be a ferrite toroidal (ring) or rod core. The rig can be operated remotely.

*Keywords:* ferromagnetic materials, educational laboratory equipment, remote control

## REFERENCES

1. Ivanov V.K. *Fizika. Elektromagnetizm: uchebnoe posobie* [Physics. Electromagnetism: A Textbook]. Saint-Petersburg: POLITEH-PRESS Publ., 2022. 265 p. (In Russ.).
2. Sivuhin D.V. *Obshchij kurs fiziki: uchebnoe posobie dlya vuzov v 5 t. T. 3. Elektrichestvo* [General Physics: A Textbook for Universities, in 5 volumes. Vol. 3. Electricity]. Moscow: Fizmatlit Publ., MFTI Publ., 2004. 656 p. (In Russ.).
3. Vonsovskij S.V. *Magnetizm: magnitnye svoystva dia-, para-, ferro-, antiferro- i ferrimagnetikov* [Magnetism: Magnetic Properties of Diamagnetic, Paramagnetic, Ferromagnetic, Antiferromagnetic, and Ferrimagnetic Materials]. Moscow: Nauka Publ., 1971. 1032 p. (In Russ.).
4. White R.M. *Quantum Theory of Magnetism*. Springer, 1969. (Russ. ed.: Uajt R. *Kvantovaya teoriya magnetizma*. Moscow: Mir Publ., 1985. 303 p.).
5. Kittel C. *Quantum Theory of Solids*. New York: Wiley, 1963. (Russ. ed.: Kittel' Ch. *Kvantovaya teoriya tverdyh tel*. Moscow: Nauka Publ., 1967. 491 p.).
6. Apushkinskiy E.G. et al. *Fizika. Elektromagnetizm. Praktikum: uchebnoe posobie* [Physics. Electromagnetism. Laboratory Manual: A Textbook]. Saint-Petersburg: POLITEH-PRESS Publ., 2024. 106 p. (In Russ.).

Contacts: *Goldberg Ekaterina Vladimirovna*,  
goldberg\_ev@spbstu.ru

The article was received by the editorial office on 09.04.2026

## INTRODUCTION

The developed setup is designed to measure the basic characteristics of a ferromagnet, namely:

$B_r$  — residual induction, measured in T in SI units;

$H_c$  — magnetic coercivity, measured in A/m in SI units;

$B_s$  — saturation induction, measured in T in SI units;

$H_s$  — magnetic field strength corresponding to saturation, measured in A/m in SI units;

$\mu_{\max}$  — maximum magnetic permeability.

The physical meaning of these quantities is given in any university physics course, for example, [1, 2]. As is known, for ferromagnets, the relationship between  $B$  and  $H$  is nonlinear. In addition to the nonlinear relationship between  $H$  and  $B$ , ferromagnets are also characterized by hysteresis (from the Greek "hysteresis" meaning "lag"). This property is expressed in the fact that when the magnetic field  $H$  changes, the magnetic field induction  $B$  "lags" behind  $H$ . As a result,  $B$  is determined not only by the current value of  $H$ , but also by previous values of  $H$ , i.e., it depends on the history of the ferromagnet. Hysteresis means that the magnetization of a ferromagnet is not a single-valued function of  $H$ . When the magnitude and direction of the external field  $\mathbf{H}$  acting on a ferromagnet change cyclically (for example, according to a sinusoidal law), the  $B(H)$  dependence is represented by a curve called a hysteresis loop. An explanation of the phenomenon of ferromagnetism can be found in classical works [3–5].

When a ferromagnet is placed in a weak alternating magnetic field that is incapable of saturating its magnetization, a loop called minor is formed. There are an infinite number of partial loops, all of which lie within the limiting hysteresis loop. The peaks of the partial hysteresis loops form the main magnetization curve, which is close to the initial magnetization curve.

Note that, due to the ambiguity of the  $B(H)$  dependence, the concept of magnetic permeability is generally applied to the initial magnetization curve. The dependence of magnetic permeability  $\mu$  on  $H$  can be constructed from this curve, since, as follows from the formula relating  $B$  and  $H$  [6]

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (1)$$

the quantity  $\mu$  is proportional to the slope tangent of the initial magnetization curve. As  $H$  increases, magnetic permeability reaches a maximum  $\mu_{\max}$ , and then rapidly decreases as magnetization saturates, asymptotically approaching unity  $\mu \sim dB / dH$ .

This setup automatically generates a hysteresis loop. The experimentally observed loop is analyzed,

and the main characteristics of the ferromagnet are determined.

## DESIGN DESCRIPTION

The setup diagram is shown in Fig. 1, and a photograph is shown in Fig. 2. The  $U_{in}$  signal from a sinusoidal voltage generator which frequency and amplitude are adjusted using the function keys on the generator panel is fed to the primary winding. Voltage  $U_x$  from resistor  $R_1$  is fed to the  $X$  input, and voltage  $U_y$  from capacitor  $C$  is fed to the  $Y$  input of the oscilloscope.

**Fig. 1.** Schematic diagram of the setup for obtaining a dynamic hysteresis loop

**Fig. 2.** Photograph of the setup for obtaining a dynamic hysteresis loop.

1 — waveform generator; 2 — sample module with integrating circuit; 3 — digital oscilloscope; 4 — resistor in the primary winding circuit; 5 — ferrite toroidal core; 6 — integrating circuit resistor; 7 — integrator capacitor

The test sample used in the student training setups is a ferrite toroidal (ring) core  $T$  of a transformer having a rectangular cross-section with an area of  $S$ . It has two windings: a primary magnetizing winding with  $n_1$  turns and a secondary measuring winding with  $n_2$  turns. Special rupture coils can be used to test removable samples and for research on selecting ferromagnets for magnetometers.

If the horizontal beam deflection on the oscilloscope screen is  $x$  divisions, and the vertical beam deflection is  $y$  divisions, then the voltages  $U_x$ ,  $U_y$ , supplied to the  $X$ ,  $Y$  inputs of the oscilloscope:

$$U_x = \alpha_x x, \quad U_y = \alpha_y y, \quad (2)$$

where  $\alpha_x$  and  $\alpha_y$  are the horizontal and vertical beam deflection coefficients, respectively, i.e., the horizontal and vertical screen scale division values.

Let's state that in this circuit, voltage  $U_x$  is proportional to the magnetic field strength  $H$ , and voltage  $U_y$  is proportional to the magnetic field induction  $B$  in the core. Current  $I_1$  in the primary winding induces a magnetic field of strength in the toroidal core.

$$H = \frac{n_1}{l} I_1. \quad (3)$$

Formula (3) is valid when resistance  $R_2$  is chosen to be sufficiently large compared to  $R_1$ , and the effect of the secondary winding current on the magnetic flux

in the core can be neglected. Here,  $l = 2\pi r$  is the circumference of the core along the centerline (the average length of the magnetic field line in the core),  $r$  is the average radius of the toroid.

A resistor  $R_1$ , is connected in series with the primary winding. The voltage drop across resistor is equal to  $U_1 = I_1 R_1$  or, taking into account (3),

$$U_1 = \frac{R_1 l}{n_1} H, \quad (4)$$

i.e., proportional to the magnetic field strength  $H$ . This voltage is fed to the  $X$  input of the horizontal sweep amplifier of the oscilloscope  $U_x = U_1$ .

From the horizontal deflection  $x$  of the beam, the strength can easily be calculated, taking into account (2) and transforming (4) to the following form

$$H = m_x x, \quad (5)$$

where

$$m_x = \frac{n_1 a_x}{l R_1} \quad (6)$$

is the  $X$  axis scale, which allows the magnetic field strength  $H$  to be determined from the image on the oscilloscope screen.

An EMF is induced in the secondary winding (in accordance with Faraday's law of electromagnetic induction), proportional to the rate of change of the magnetic field induction in the sample, the modulus of which is equal to:

$$\varepsilon = n_2 \frac{d\Phi}{dt} = n_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (7)$$

where  $S$  is the cross-sectional area of the core,  $\Phi = BS$  is the magnetic flux through each turn. From (7), it follows that to determine the induction  $B$ , it is necessary to integrate the EMF in the secondary winding of the test sample over time:

$$B = \frac{1}{n_2 S} \int \varepsilon dt. \quad (8)$$

To perform this operation, a simple integrating  $RC$  circuit is used in the setup scheme. It consists of a resistor with resistance  $R_2$  and a capacitor with capacitance  $C$  connected in series.

The voltage across the entire  $RC$  circuit is  $\varepsilon$ ; the output signal is the voltage across the capacitor  $U_y = U_c$ . This signal from the capacitor is fed to the input of the vertical sweep amplifier of the oscilloscope (see Fig. 1). Integration will be achieved provided that  $U_y \ll U_{Bx}$ , (i.e.,  $U_c \ll \varepsilon$ ), which is fulfilled if the active resistance  $R_2$  is much greater than the capacitor  $C$  resistance to the alternating current, i.e.  $R_2 \gg 1/(\omega C)$  (in this work, the required inequality is

satisfied). In this case, the secondary winding current is determined only by the value of the resistance  $R_2$ :

$$I_2 \approx \frac{\varepsilon}{R_2}. \quad (9)$$

The voltage across a capacitor is determined by its charge  $U_c = q / C$ , and the charge  $q$  can be calculated by integrating the current  $I_2$  over time. Thus, taking into account (7):

$$U_y = U_c = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{n_2 S}{C R_2} \int \frac{dB}{dt} dt = \frac{n_2 S}{C R_2} B. \quad (10)$$

which is what was required to be proven.

Considering that the vertical beam deflection  $y$  is proportional to the voltage  $U_y$  (formula (2)), we transform (10) to the form:

$$B = m_y y, \quad (11)$$

where

$$m_y = \frac{R_2 C a_y}{S n_2} \quad (12)$$

is the  $Y$ -axis scale, which allows the corresponding value of the magnetic field induction  $B$  to be calculated from the measured vertical beam deflection  $y$ .

When alternating voltages of the same frequency are simultaneously applied to the  $X$  and  $Y$  inputs of the oscilloscope, one of voltages is proportional to the field strength in the transformer core ( $U_x \sim H$ ), and the other to the magnetic field induction ( $U_y \sim B$ ), the oscilloscope screen displays the dynamic dependence  $B(H)$ , i.e., a hysteresis loop.

#### **Characteristics of the training setup.**

- Input voltage range of the AC magnetizing winding: 0–20 V.
- Input voltage frequency for hysteresis observation: 3.7 kHz.
- Dimensions (L × W × H): 414 × 189 × 156 mm.
- Weight: 3.5 kg.
- Ferrite core 1: B64290-L638-X35 (material T35 Mn-Zn, dimensions d22 × d13 × 6 mm).
- Ferrite core 2: M6000NM (material Ni-Zn, dimensions d45 × d28 × 4 mm).

## **TEST RESULTS**

A UNIT UTG1005A waveform generator and a UNIT UTD2025CL oscilloscope were used as measuring instruments in the test rig with ferrite core 2.

The following characteristics of the ferromagnetic material were obtained:  $H_c = 3.6$  A/m;  $B_r = 48$  mT;  $B_s = 200$  mT;  $\mu_{\max} = 10\,000$ . The experimental graph

of magnetic permeability versus magnetic field strength is shown in Fig. 3.

**Fig. 3.** Dependence of magnetic permeability on magnetic field strength

### REMOTE WORK

Software was developed to enable remote work. To perform the lab work remotely, one needs a video conferencing application and an application for remote access and computer control (or an application that implements both of these functions). In this description, we consider working with Microsoft Teams.

Before starting work, the instructor (or lab assistant) turns on all the lab equipment, the video camera, and the computer connected to the lab. The computer provides startup of MS Teams and the remote control program for the "Hysteresis of a ferromagnet" lab (hereinafter, we will refer to this program as "Hysteresis"). The program interface largely replicates the interface of the lab equipment and allows for full computer control. The generator control interface is located in the upper left part of the program window, the image window from the video camera recording the lab equipment in real time is in the upper right part, and the oscilloscope control interface is located at the bottom.

The oscilloscope and generator are controlled in the program window using the computer mouse. Left-clicking a button (LCB) on the virtual oscilloscope or generator in the program window replicates a physical click on the button on the actual oscilloscope or generator. It's worth noting that after left-clicking any of the oscilloscope control buttons, physical control of the actual oscilloscope is locked (i.e., the actual oscilloscope stops responding to any button presses on the control panel). To unlock the physical oscilloscope controls, one should click the unlock icon (lock) on the virtual oscilloscope in the program window by LCB. The difference between the virtual generator control panel and the physical generator control panel is that the multifunctional toggle knob and directional arrow buttons are located in the same area of the virtual control panel (in the upper right corner of the panel). A dark virtual control screen for an oscilloscope or generator in the program window and a crossed-out USB symbol (for a generator, this USB symbol is located in the lower left corner of its panel; for an oscilloscope, it's at the very bottom (approximately in the middle) of its panel) mean that the connection between the oscilloscope or generator and the computer is not established (either the corresponding

device is turned off or there is no USB connection between the device and the computer).

### PRACTICAL APPLICATIONS

As is well known, ferromagnets (and ferrites, a subclass of them) are widely used in modern technology. Here are some applications for T35 ferrite.

1. Magnetic heads for analog audio recording (an obsolete but historically important use).
2. DC-bias chokes (filter chokes in power electronics).
3. Pulse and broadband transformers.
4. Antennas for the magnetic component of the EM field (radio reception, measurements).
5. Soft magnetic sensor elements (e.g., in fluxgates).

Let's look at the last application in more detail. A fluxgate is an active sensor that doesn't measure the field directly but converts it into an electrical signal using the unique properties of T35 ferrite. High saturation induction and low hysteresis losses allow the core to be effectively and distortion-free saturated by a high-frequency alternating field, which is the operating principle of a fluxgate. It is the combination of low  $\mu$  and high  $B_s$  that gives T35 its steep nonlinear magnetization characteristic, which drives the fluxgate's operation. The design of such a fluxgate is fundamentally no different from the design of our setup (except that a rod must be used instead of a ring). Its operating principle can be described as cyclic saturation:

- the current in the excitation winding creates a strong alternating field  $H_{\sim B036}$  in the core;
- this field is so strong that it puts the T35 core into a state of magnetic saturation twice per cycle (at the positive and negative peaks).

This occurs even without any external field. Suppose we want to measure a weak constant or low-frequency field (for example, geomagnetic). This field  $H_{BHEIII}$  is added to the excitation field  $H_{\sim B036}$ . Due to nonlinearity (the rectangularity of the loop), this addition disrupts the symmetry of the magnetization reversal process. Saturation now occurs non-simultaneously in the positive and negative half-waves. If  $H_{BHEIII}$  is aligned with  $H_{\sim B036}$ , saturation will occur earlier. If it is directed oppositely, it will occur later. Thus, a weak constant field causes a time shift (phase shift) in the moments of saturation.

As a result, an EMF proportional to the rate of change of induction ( $dB/dt$ ) is induced in the measuring winding. The signal in this EMF is the derivative of the distorted  $B(t)$  curve. The  $B(t)$  curve, symmetrical without an external field, contains only odd harmonics of the fundamental excitation frequency in its spectrum. When  $H_{BHEIII}$  appears and symmetry is

broken in the signal spectrum, an even harmonic, primarily the second, suddenly appears and increases. The amplitude of this second harmonic is directly proportional to the magnitude of the measured field  $H_{\text{внеш.}}$ .

Let's define what fields the T35 fluxgate can measure. A fluxgate is an instrument for measuring the magnetic induction vector, or more specifically, its component along the core axis. Due to the nature of the field, it can measure the following types of fields:

Constant magnetic fields (DC). Main applications:

- geomagnetic field ( $\sim 50 \mu\text{T}$ );
- permanent magnet fields;
- man-made constant fields.

Low-frequency alternating fields (AC) from fractions of a Hz to several kHz:

- industrial power lines (50/60 Hz);
- biomagnetic fields (heart — 1–40 Hz, brain — up to 100 Hz).

In terms of magnitude (strength measurement range), the T35 fluxgate is particularly suitable for weak and ultra-weak fields:

- lower limit: determined by the inherent noise and circuit stability (from 0.01–0.1 nT) for precision laboratory instruments;
- upper limit: determined by the linearity of the response and ultimately by the saturation induction  $B_s$  of the T35 (usually up to 0.1–1 mT); for stronger fields, the design is modified.

We will point out some specific applications where our setup can be used after being customized for a specific task.

1. Geophysics and exploration:

- magnetic exploration (search for ore bodies and archaeological sites);
- measurement of the Earth's magnetic field (observatory magnetometers);
- marine and aeromagnetic surveys.

2. Space exploration:

- magnetometers on satellites and space probes to study planetary magnetic fields and solar wind.

3. Scientific research:

- measurement of weak fields in physics experiments;
- magnetocardiography and magnetoencephalography (in these areas, fluxgates have been largely replaced by SQUID, but are still used in simpler systems).

4. Non-destructive testing:

- detection of defects in ferromagnetic materials by magnetic field distortion.

## CONCLUSION

This article describes the work being conducted at the Physics Department of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University to create a modern physics practical course for future engineers. One of the projects is highlighted and features modern applications of physical effects and phenomena in engineering. The setups are equipped with digital instruments and can be replicated, as design documentation has been developed for them. Recent experience has shown that circumstances may limit students' access to the laboratory. Therefore, we have provided a remote control mode for the setups, which is not the primary but possible. Clearly, under normal circumstances, remote control can be the primary mode for sedentary students and distance-learning students. It is important to emphasize that this is a real experiment, conducted by students, and not a computer simulation. Thus, based on the experience of this work, an educational laboratory can be created that corresponds to the spirit of the present time, in which students and teachers can, in addition to training, work on the creation of devices that are in demand in many areas of modern technology.