

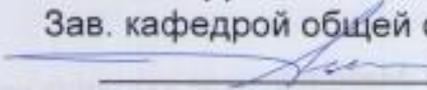
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой общей физики ФТИ

 А.М. Лидер

« ____ » _____ 2017 г.

**Изучение явления гистерезиса ферромагнитных
материалов**

Методические указания к выполнению лабораторной работы
2-18 по курсу «Общая физика» для студентов всех
направлений и специальностей

Издательство
Томского политехнического университета
2017

УДК 537
ББК 22.2

Изучение явления гистерезиса ферромагнитных материалов:
методические указания к работе 2-18 по курсу «Общей физики» для
студентов всех направлений и специальностей / сост. В.С. Сыпченко.
Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского
политехнического университета, 2017. – 21 с.

УДК 537
ББК 22.2

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
Общей физики ФТИ
« _____ » 2017 г.

Председатель
учебно-методической комиссии  А.М. Лидер

Рецензенты

Доктор педагогических наук,
профессор кафедры ОФ ФТИ НИ ТПУ

В.В. Ларионов

Старший преподаватель
кафедры ОФ ФТИ НИ ТПУ

Т.Н. Мельникова

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цели работы: изучить магнитные свойства ферромагнетиков, ознакомиться с явлением магнитного гистерезиса.

Приборы и принадлежности: железные U-образные сердечники (сплошной и пластинчатый), две катушки (600 витков, 5 Ом), коммутатор, реостат (10 Ом, 5,7 А), универсальный источник питания, датчик Холла тангенциальный, универсальный измерительный блок «Кобра 3», компьютер, программное обеспечение.

Краткое теоретическое введение

1. Физические величины, описывающие магнитное поле в веществе и характеристика магнетиков.

Всякое вещество является магнетиком, т.е. способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться).

Для объяснения намагничивания тел Ампер предположил, что в молекулах вещества циркулируют круговые токи (получившие впоследствии название молекулярных токов Ампера). Каждый такой ток обладает магнитным моментом и создает в окружающем пространстве магнитное поле. В отсутствие внешнего поля ($\vec{H} = 0$) молекулярные токи ориентированы хаотично, вследствие чего обусловленный ими результирующий магнитный момент равен нулю ($\sum_i \vec{P}_{mi} = 0$). Под действием поля ($\vec{H} \neq 0$) магнитные моменты молекул приобретают преимущественную ориентацию в одном направлении, вследствие чего суммарный магнитный момент вещества становится отличным от нуля ($\sum_i \vec{P}_{mi} \neq 0$), и вещество намагничивается.

Намагниченность магнетика принято характеризовать магнитным моментом единицы объема. Эту величину называют вектором намагничивания (или намагниченности) $\vec{J} = \frac{\sum_i \vec{P}_{mi}}{\Delta V}$ (суммирование производится по объему ΔV). Величина вектора намагничивания зависит от намагничивающего поля и может быть выражена следующим соотношением:

$$\vec{J} = \chi_m \vec{H} \quad (1)$$

где χ_m – магнитная восприимчивость – величина, зависящая от природы вещества.

Таким образом, для описания магнитного поля в магнетиках используют три вектора: намагничивания (\vec{J}), вектором напряженности поля (\vec{H}) и вектором магнитной индукции (\vec{B}). Они взаимосвязаны следующим образом:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}) \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Или с учетом (1):

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \chi_m \vec{H}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H}$$

Величина $(1 + \chi_m)$ называется относительной магнитной проницаемостью вещества и обозначается μ . Таким образом, в изотропных средах:

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \quad (3)$$

Магнитная восприимчивость χ_m бывает, как положительной, так и отрицательной. Поэтому магнитная проницаемость μ может быть, как больше, так и меньше единицы.

В зависимости от знака и величины магнитной восприимчивости все магнетики подразделяются на три группы:

1) диамагнетики, у которых $\chi_m < 0$ и мала по абсолютной величине ($\sim 10^{-6}$);

2) парамагнетики, у которых $\chi_m > 0$ и тоже мала ($\sim 10^{-5} \div 10^{-3}$);

3) ферромагнетики, у которых $\chi_m \gg 0$ и достигает очень больших значений ($\sim 10^2 \div 10^5$). Кроме того, в отличие от диа- и парамагнетиков, для которых χ_m не зависит от H , магнитная восприимчивость ферромагнетиков является функцией напряженности магнитного поля.

Таким образом, в изотропных веществах вектор намагниченности может, как совпадать по направлению с направлением вектора напряженности магнитного поля (пара- и ферромагнетики), так и быть направленным в противоположную сторону (диамагнетики).

2. Качественные основы диа- и парамагнетизма

Гипотеза Ампера о природе магнетизма получила свое объяснение после того, как было открыто атомное ядро, и утвердилась планетарная модель атома. Движение электрона вокруг ядра атома по замкнутой орбите эквивалентно круговому току, который можно характеризовать магнитным моментом \vec{P} , называемым орбитальным магнитным моментом электрона. Кроме того, электрон имеет собственный магнитный момент, называемый спиновым магнитным моментом. Магнитный момент многоэлектронного атома будет векторной суммой орбитальных и спиновых моментов всех его электронов.

При суммировании магнитных моментов атома возможны два варианта: суммарный магнитный момент атома равен нулю или не равен нулю.

Влияние магнитного поля на движение электронов в атомах вещества упрощенно состоит в следующем. В магнитном поле на движущийся электрон помимо кулоновской силы \vec{F}_e со стороны ядра действует еще и сила Лоренца \vec{F}_L (рис. 1). Если плоскость орбиты электрона перпендикулярна магнитному полю \vec{H} , то это приводит к изменению центростремительной силы, действующей на электрон, и, как следствие этого, к изменению угловой скорости его вращения по орбите. Если же орбита электрона расположена произвольным образом относительно вектора \vec{H} так, что орбитальный магнитный момент электрона составляет с вектором \vec{H} угол α , то влияние поля оказывается более сложным. В этом случае вся орбита приходит в такое движение, при котором угол α сохраняется неизменным, а вектор \vec{P}_m вращается вокруг направления \vec{H} с определенной угловой скоростью. Такое движение в механике называется прецессией. Изменение угловой скорости вращения электрона или, в общем случае, появление прецессии эквивалентно дополнительному орбитальному току ΔI_{orb} (рис. 1 а, б), которому соответствует индуцированный орбитальный момент электрона $\Delta \vec{P}_m$. Этот вектор противоположен по направлению вектору напряженности магнитного поля \vec{H} . Если в атоме имеется несколько электронов, то общий индуцированный орбитальный момент атома равен векторной сумме индуцированных орбитальных магнитных моментов всех электронов:
$$\Delta \vec{P}_m = \sum_i \Delta \vec{P}_{mi}.$$

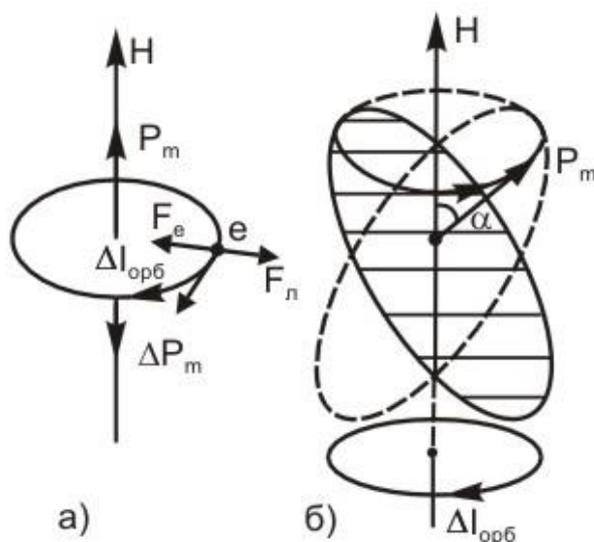


Рис. 1. Возникновение индуцированного магнитного момента в случаях:

а) плоскость орбиты перпендикулярна вектору \vec{H} ; б) нормаль плоскости орбиты составляет угол α с направлением вектора \vec{H} .

С помощью этого результата, примененного к атому любого вещества, помещенного в магнитное поле, может быть объяснено явление диа- и парамагнетизма. У диамагнетиков магнитные моменты атомов при отсутствии магнитного поля ($\vec{H} = 0$) равны нулю. При внесении диамагнитного вещества в магнитное поле в каждом его атоме индуцируется магнитный момент, направленный противоположно вектору напряженности магнитного поля \vec{H} , и, следовательно, вектор намагничивания \vec{J} также направлен противоположно вектору \vec{H} .

3. Свойства ферромагнетиков и качественные основы природы ферромагнетизма

Особый класс магнетиков образуют вещества, у которых магнитная проницаемость в сотни и тысячи раз превышает магнитную проницаемость обычных материалов. Эти вещества получили название ферромагнетиков. К ним относятся железо, никель, кобальт и их соединения и сплавы.

Другой отличительной особенностью ферромагнетиков является то, что их намагниченность \vec{J} зависит от \vec{H} нелинейно, и при больших полях наступает состояние магнитного насыщения (рис. 2). Поскольку зависимость \vec{J} от \vec{H} нелинейная, то и магнитная восприимчивость χ_m зависит от напряженности (рис. 2). Кроме нелинейной зависимости между \vec{J} и \vec{H} (или между \vec{B} и \vec{H}) для ферромагнетиков характерно также наличие явления гистерезиса (рис. 3).

Это явление заключается в том, что процесс намагничивания ферромагнетика необратим в большей своей части, поэтому кривая намагничивания не совпадает с кривой размагничивания. Если первоначально размагниченный образец намагнитить в постепенно возрастающем магнитном поле по кривой $0-a$ (кривая первоначального намагничивания), а затем уменьшить напряженность магнитного поля, то индукция \vec{B} следует не по первоначальной кривой $0-a$, а изменяется в соответствии с кривой $a-b$. Когда напряженность внешнего магнитного поля H станет равной нулю (точка b), намагничение не исчезает и характеризуется величиной $B_{ост}$ (отрезок $0-b$ на рис. 3), которая называется остаточной индукцией. Намагниченность имеет при этом значение J_r , называемое остаточной намагниченностью. Намагниченность

обращается в нуль лишь под действием поля H_c (отрезок $0-c$ на рис. 3) обратного направления. Величина напряженности поля H_c называется коэрцитивной силой ферромагнетика («прочность» намагничивания). Существование остаточной намагниченности делает возможным изготовление постоянных магнитов. Постоянный магнит тем лучше сохраняет свои свойства, чем больше величина коэрцитивной силы материала, из которого он изготовлен. Полный цикл изменения магнитного поля \vec{B} с изменением \vec{H} изображается замкнутой кривой $abdea$ (рис. 3). Эта кривая называется петлей гистерезиса.

Опытами Эйнштейна и де Гааза было доказано, что ответственными за магнитные свойства ферромагнетиков являются собственные (спиновые) магнитные моменты электронов (а не орбитальные, как у диа- и парамагнетиков). Атомы элементов, обладающих ферромагнитными свойствами (Fe, Co, Ni), имеют некоторую особенность. В них нарушается последовательность заполнения мест в оболочках и слоях: прежде чем полностью "застроится" нижняя оболочка, начинается заполнение выше расположенной оболочки. В результате электронные спины некоторых внутренних оболочек оказываются нескомпенсированными. Таким образом, ферромагнитными свойствами могут обладать только такие вещества, в атомах которых имеются недостроенные внутренние электронные оболочки. Кроме того, исследования ферромагнитных кристаллов позволили выявить

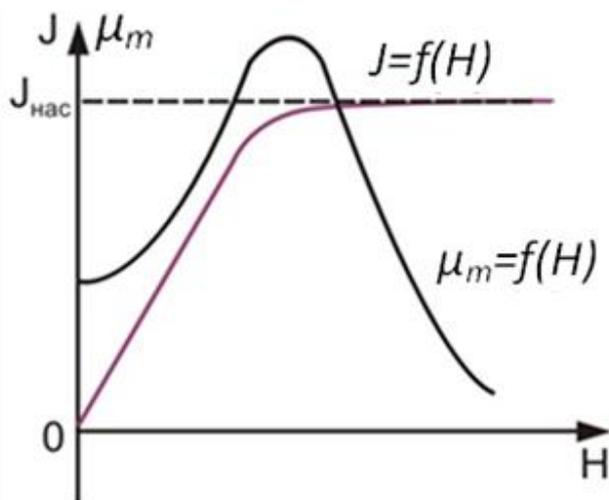


Рис. 2. Зависимость намагниченности J и магнитной восприимчивости χ_m от напряженности H магнитного поля

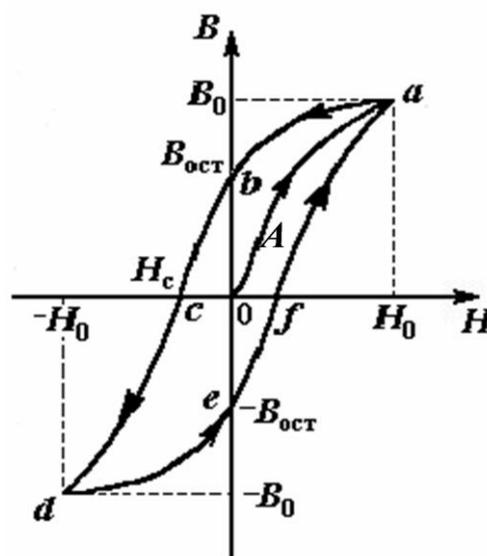


Рис. 3. Петля гистерезиса ферромагнетика

в них области с самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью

– так называемые домены, линейные размеры которых 1-10 мкм (рис. 4).

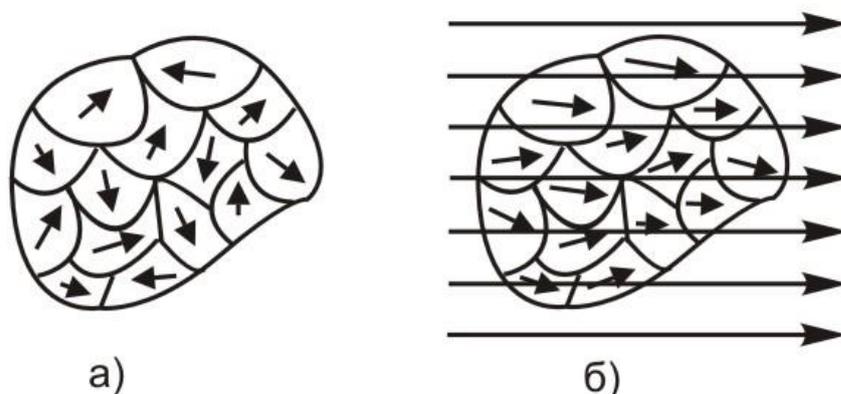


Рис. 4. Доменная структура ферромагнетика. а) в отсутствие внешнего поля, б) при наличии внешнего поля.

В пределах каждого домена не скомпенсированные спины ориентированы в одном направлении, т.е. вещество в домене находится в состоянии магнитного насыщения и обладает определенным магнитным моментом. Направления этих моментов для разных доменов различны, так что в отсутствие внешнего поля суммарный момент всегда равен нулю. Силы, которые заставляют магнитные моменты электронов выстраиваться параллельно друг другу, называются обменными. Их объяснение в рамках классической физики невозможно (дается только квантовой механикой).

Если поместить ферромагнетики во внешнее магнитное поле, то вначале при слабых полях наблюдается смещение границ доменов (область 0-А кривой намагничивания на рис. 3). В результате этого происходит увеличение тех доменов, магнитные моменты которых составляют с направлением поля \vec{H} меньший угол за счет доменов, у которых угол между \vec{P}_m и \vec{H} больше. При увеличении \vec{H} имеет место поворот магнитных моментов доменов в направлении поля (область А-а кривой намагничивания на рис. 3). При этом моменты электронов в пределах домена поворачиваются одновременно, без нарушения параллельности друг другу. Эти процессы являются необратимыми, что и служит причиной гистерезиса. *Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, идущей на преодоление сопротивления при повороте магнитных моментов ферромагнетика. Эта энергия расходуется на нагревание ферромагнетика.*

Для каждого ферромагнетика имеется определенная температура T_c при которой области спонтанного намагничивания

распадаются и вещество утрачивает ферромагнитные свойства (становится обычным парамагнетиком). Эта температура называется точкой Кюри.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе изучается намагничивание железного сердечника. На U -образный сердечник надеваются две катушки, по которым протекает постоянный регулируемый ток. Этот ток образует в сердечнике магнитное поле. Форма сердечника такова, что линии магнитной индукции проходят целиком в железном сердечнике. В этом случае напряженность магнитного поля в сердечнике равна напряженности магнитного поля намагничивающих токов. Для определения напряженности поля используется формула для поля тороида, т.к. замкнутый сердечник с намагничивающей обмоткой является разновидностью тороида:

$$H = nI, \quad (4)$$

где I – ток в намагничивающей обмотке; $n = N/L$ – число витков намагничивающей обмотки на единицу длины средней линии тороида (сердечника), для сплошного сердечника $n = 2586 \text{ м}^{-1}$, а для пластинчатого сердечника $n = 2459 \text{ м}^{-1}$.

Данные о силе тока в намагничивающей обмотке и индукции магнитного поля в сердечнике передаются на компьютер с помощью базовой установки «Кобра 3». Так как интерфейс Кобра 3 измеряет напряжение, сила тока в намагничивающей обмотке определяется как $I = U/R$, где U – напряжение, $R = 10 \text{ Ом}$ – сопротивление катушек.

Индукция магнитного поля сердечника измеряется при помощи тангенциального датчика Холла. Принцип работы датчика основан на явлении Холла. Датчик соединяется с измерительным блоком «Кобра 3» через измерительный модуль Тесла. Размещается датчик под ярмом, прямо рядом с отверстием в сердечнике.

При снятии петли гистерезиса направление магнитного поля в сердечнике меняют на противоположное, изменяя направление тока в катушках, при переключении коммутатора.

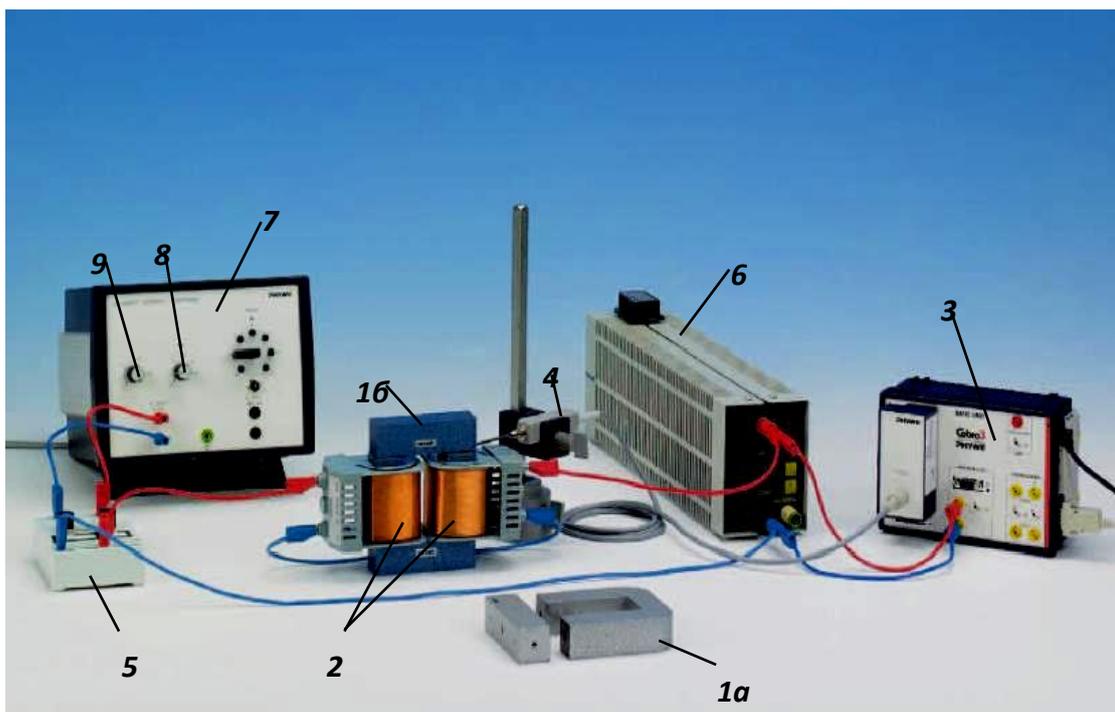


Рис. 5. Общий вид лабораторной установки. 1а – сплошной железный сердечник, 1б – пластинчатый железный сердечник, 2 – катушка, 3 – измерительный модуль, 4 – датчик Холла, 5 – коммутатор, 6 – реостат, 7 – источник питания, 8 – регулятор тока, 9 – регулятор напряжения.

Внимание!

- Переключение коммутатора производите только при напряжении 0 В.
- Сердечник и катушки должны быть как можно дальше расположены от измерительного блока «Кобра 3» и компьютера.
- Индукция магнитного поля не должна превышать 1 Т.

ЗАДАНИЯ

1. Снять кривую намагничивания для цельного и/или пластинчатого железных сердечников.
2. Построить петлю гистерезиса. Определить коэрцитивную силу и остаточную намагниченность для исследуемых сердечников.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение 1. Снятие кривой намагничивания ферромагнетика

1. Соберите цепь как показано на рисунке 5, установите сплошной сердечник (серый).
2. Включите питание измерительного блока «Кобра 3».
3. Запустите программу «Phywe measure».
4. В строке меню выберите «Приборы» – «Кобра 3 Сила/Тесла».

5. Установите параметры измерения, как указано на рис. 6.
6. В окне «Параметры» – «Напряжение/Ток» установите значение сопротивления «Резистор» 10 Ом (полное сопротивление двух катушек). Предельное значение силы тока (Диапазон оси у: Ток 1) установите ± 3000 мА, «Единицы измерения I» – А, как указано на рис. 7.

Кобра3 Сила / Тесла <Серийный No: 91508432-515-13269>

Модули
Modul: Плотность пото В S1: нет модуля / датчика S2: Ток (Шунт) I

Каналы
Плотность пото В
Ток I
Ручной ввод

Таймер / Счетчик
не соединен Угол

Х данные
Ток I
 сортировать

Обычное измерение | Быстрое измерение

Начало измерения
 нажатием клавиши
 время 13:20:15
 если Плотность пото В
 больше меньше 0

Конец измерения
 нажатием клавиши
 время 13:20:15
 после 0 значения
 если Плотность пото В
 больше меньше 0

Дисплей
 Цифр. дисплей 1 Цифр. дисплей 2
 Цифр. дисплей 3 Цифр. дисплей 4
 Аналог. дисплей 1 Аналог. дисплей 2
 Диаграмма 1 Диаграмма 2

Точное измерение
 Провести точное измерение

Получить значение
 нажатием клавиши
 каждые 1 s

Параметры...

Далее Отмена

Cobra3 - 01.20/3

Рис. 6. Параметры измерения.

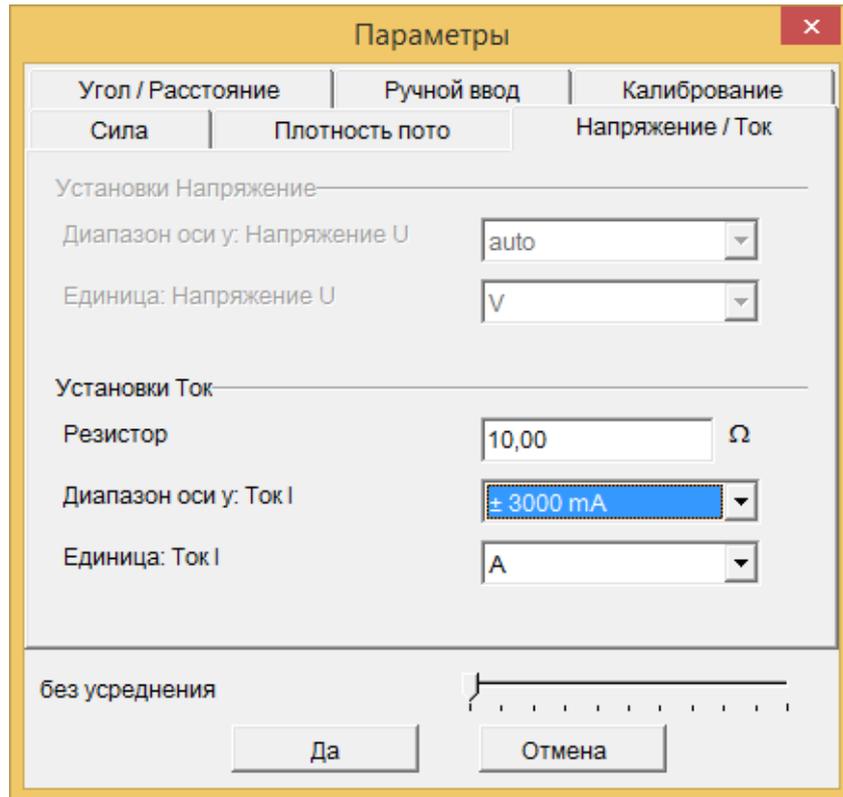


Рис. 7. Настройка параметров «Напряжение/Ток»

7. В окне «Параметры» – «Плотность потока» установите пределы измерения индукции (Диапазон оси у: плотность потока B) ± 1 Т и единицы измерения (Единица: Плотность потока B) – мТ (рис. 8).

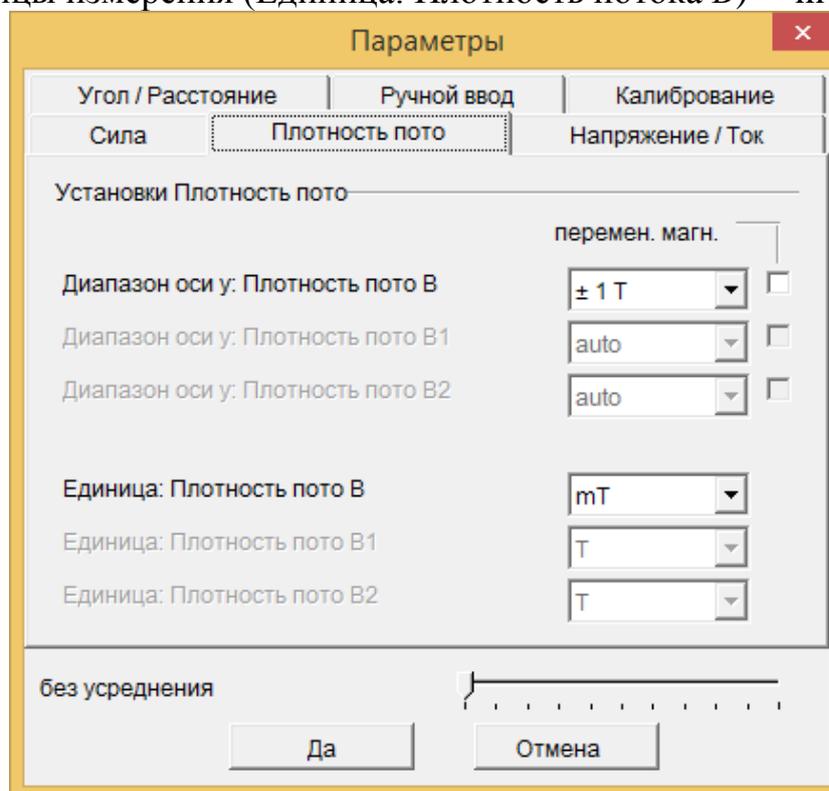


Рис. 8. Настройка параметров «Плотность потока»

8. Калибровку датчика Холла проводите, удалив датчик на достаточно большое расстояние от катушек с сердечником и других магнитов. Для калибровки перейдите в «Параметры» выберите вкладку «Калибрование», калибруем рис. 9. Примените, изменения нажав кнопку «Да».
9. Для измерения индукции магнитного поля в сердечнике датчик разместите под ярмом, прямо рядом с отверстием в сердечнике, как показано на рис. 5.
10. На реостате установите максимальное сопротивление 10 Ом, как показано на рис. 5.
11. Начните измерения, нажав кнопку «далее», значения силы тока и индукции магнитного поля будут отображаться на экране компьютера рис. 10.

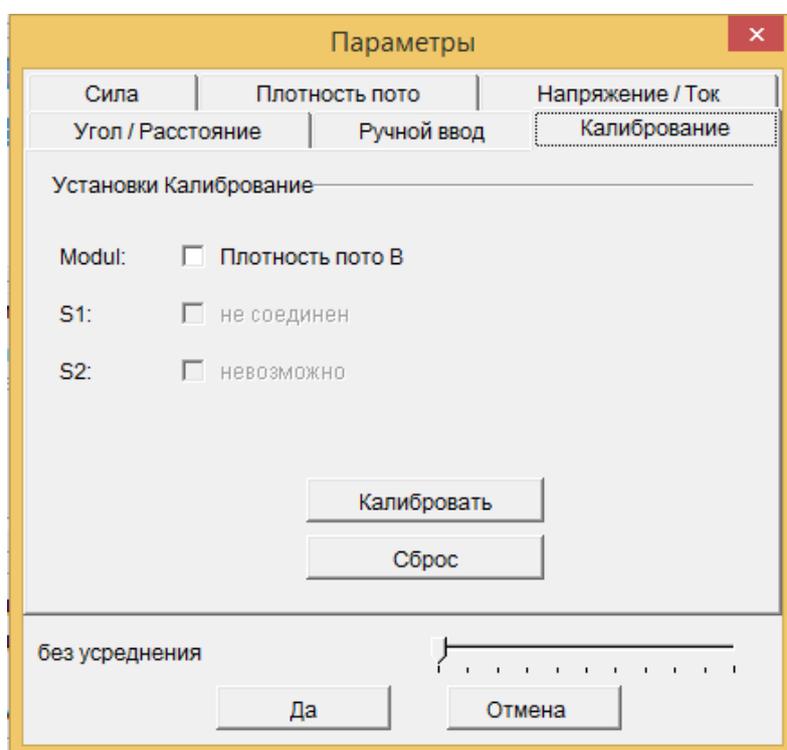


Рис. 9. Настройка параметров «Калибрование»

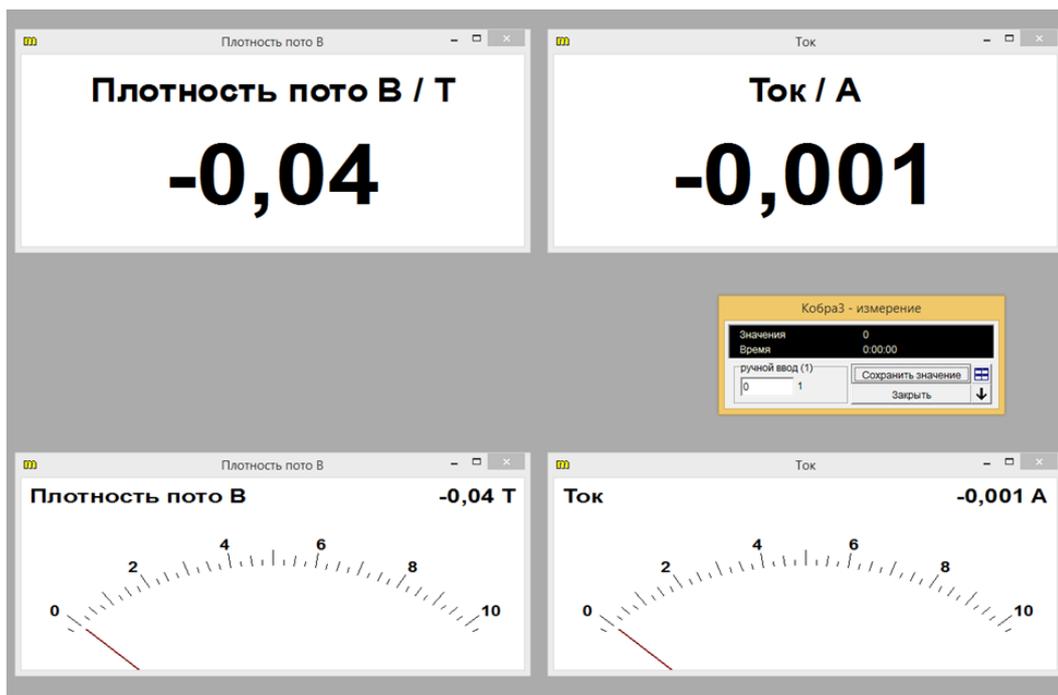


Рис.10. Вид окна показаний тока и магнитной индукции при измерении

12. Включите источник питания (кнопка включения на задней панели), рис. 11, убедившись, что ручки регулировки тока и напряжения находятся в крайнем левом положении.

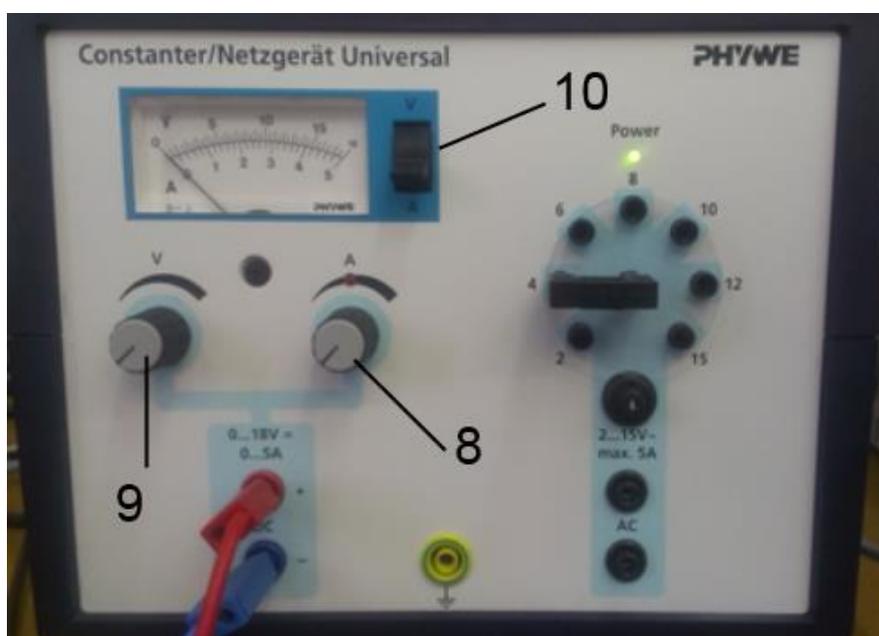


Рис. 11. Передняя панель источника питания. 8 – регулятор тока, 9 – регулятор напряжения, 10 – переключатель ток/напряжение

13. Установите регулятор тока на источнике питания в крайнее правое положение, что соответствует максимальному току, переключатель 10 в режиме тока (флажок в низ).

Внимание!

- Если в железном сердечнике наблюдается остаточная магнитная индукция ($B \neq 0$), необходимо размагнитить сердечник, (на рис. 10 плотность потока равна $- 0,04$ В/Т), выполнив следующие действия:
- установите напряжение на коммутаторе 5 рис. 5 так, чтобы генерировалось обратное к остаточной намагниченности магнитное поле;
- Регулятором напряжения 9 рис. 11 резко повысьте и затем сбросьте напряжение; повторите эту процедуру несколько раз, каждый раз переключая коммутатор и уменьшая напряжение, пока намагниченность станет равной нулю ($B \approx 0$).

14. Запись значений производите с шагом $\Delta I = 20 \div 40$ мА, от 0 до I_{\max} , увеличивайте напряжение ручкой регулировки «V» на панели источника питания. (Максимальное значение силы тока для пластинчатого сердечника не должно превышать 1,3 А, а для сплошного – 1,9 А.)

15. Плавно увеличивайте напряжение и записывайте значения B и I нажатием левой клавиши компьютерной мыши «сохранить значение» (одно нажатие – одно значение).

16. Остановите измерения нажатием кнопки «Заккрыть». Уменьшите напряжение до 0 В.

17. Записанные значения представьте в виде графика $B(I)$. Полученная зависимость должна соответствовать кривой на участке 0-а рис. 3

18. Данные сохраните в формате .txt. Для этого в меню «Измерения» выберите: «Экспорт данных» – «Куда: сохранить в файл» – «Формат: экспортировать как ч...».

19. Рассчитайте для всех токов напряженность магнитного поля $H = nI$ (для сплошного сердечника $n = 2586$ м⁻¹, для пластинчатого сердечника $n = 2459$ м⁻¹).

20. Рассчитайте для всех токов намагниченность железа по формуле:

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

21. Рассчитайте относительную магнитную проницаемость сердечника для всех значений напряженности магнитного поля по

формуле: $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$

22. Постройте на одном чертеже графики зависимости $B = f(H)$, $\mu = f(H)$, $J = f(H)$ и проанализируйте их.

Упражнение 2. Изучение явления магнитного гистерезиса

1. Выполните действия, указанные в пунктах 3 – 13 упражнения 1.
2. Запись значений производите с шагом $\Delta I = (20 \div 40)$ мА, от 0 до I_{\max} , увеличивайте напряжение ручкой регулировки «V» на панели источника питания, а потом от максимального до нуля. Полученные данные соответствуют участку 0-*a-b* петли гистерезиса на рис. 3.

Внимание! Переключение коммутатора производите только при напряжении 0 В.

3. Измените полярность напряжения, переключив ключ коммутатора, и меняйте ток от 0 до I_{\max} (участок *c-d* на рис. 3) и обратном направлении (участок *d-e* на рис. 3).
4. Снова измените полярность напряжения, увеличивая ток от 0 до I_{\max} (участок *e-f-a*) и закончите измерения нажатием кнопки «заккрыть». Уменьшите напряжение до 0 В.
5. Записанные значения будут представлены в виде графика $B(I)$. Для четкого графического представления данных выберите в меню «Измерения» – «Параметры дисплея» – «Каналы» (или двойным кликом левой клавишей мыши по графику). В появившемся окне «Параметры дисплея» во вкладке «Интерполяция» выбрать функцию – «нет», далее нажмите «Да».
6. Для построения графика зависимости индукции магнитного поля от напряженности $B(H)$ необходимо изменить канал по оси абсцисс. Для этого в меню «Анализ» – «изменение каналов» выберите параметры согласно рис. 12. В строке «Операция» $f = I \cdot n$, введите значение n , соответствующее исследуемому сердечнику (для сплошного сердечника $n = 2586 \text{ м}^{-1}$, а для пластинчатого сердечника $n = 2459 \text{ м}^{-1}$).

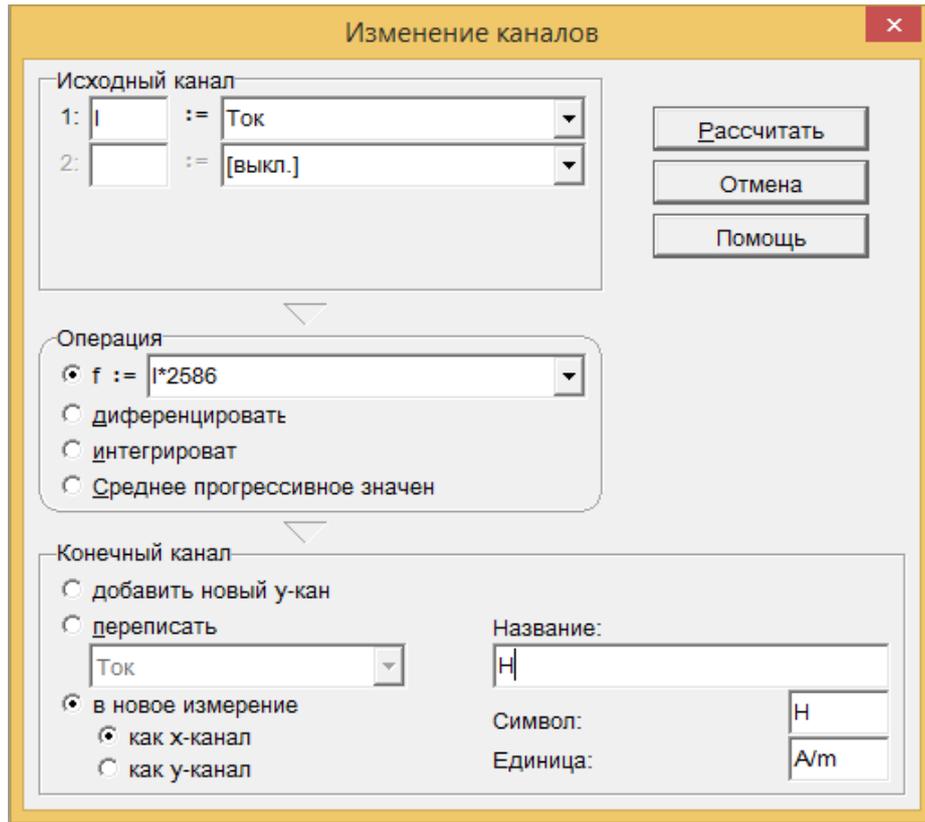


Рис.12. Изменение канала по оси абсцисс

7. По графику $B(H)$ определите коэрцитивную силу H_c и остаточную индукцию $B_{ост}$ (рис. 3). Для этого используйте функцию «Обзор» (на панели инструментов .
8. Данные с графика $B(H)$ сохраните в формате .txt. Для этого в меню «Измерения» выберите: «Экспорт данных» – «Куда: сохранить в файл» – «Формат: экспортировать как ч...».
9. Замените сердечник и повторите эксперимент. (**Задание выполняется по рекомендации преподавателя**).
10. Сравните результаты, полученные для сплошного и пластинчатого сердечников. (**Задание выполняется по рекомендации преподавателя**).
11. Сделайте вывод о проделанной работе.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Почему зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от индукции намагничивающего поля имеет максимум?
2. Как объяснить наличие остаточной намагниченности у ферромагнетиков?
3. Что такое частные петли гистерезиса?

4. Каковы значения магнитной проницаемости для парамагнитных, диамагнитных веществ? Какое физическое содержание отражено этими числами?
5. Какой физический смысл имеет площадь петли гистерезиса?
6. Что следует понимать под термином «намагниченный магнетик»? Что называется вектором намагниченности? Каков его физический смысл? Какая единица измерения вектора намагниченности в СИ?
7. Какой класс магнитных материалов называется ферромагнетиками? Что такое спонтанная намагниченность и как она зависит от температуры?
8. Какими представлениями пользуются при описании макроскопического поля внутри магнетика? Какая связь существует между вектором намагниченности и плотностью «токов Ампера», а также плотностью «фиктивных магнитных зарядов»?
9. Как определить индукцию и напряженность магнитного поля, созданного только намагниченным магнетиком? Какая связь существует между векторами индукции, напряженности и намагниченности?
10. Какой вид имеют граничные условия для векторов индукции и напряженности магнитного поля на границе раздела магнетик – вакуум, если известна функция распределения намагниченности магнетика, а токи проводимости на поверхности распределения отсутствуют?
11. Какой магнетик называют однородным и какой изотропным? Что можно сказать о функции распределения намагниченности для однородного и изотропного магнетика?
12. Поясните, как работает датчик Холла.
13. Какая существует связь между вектором намагниченности магнетика и вектором напряженности магнитного поля для однородного и изотропного магнетика?
14. Что называется магнитной восприимчивостью магнетика, каков ее физический смысл этого понятия? Единица измерения магнитной восприимчивости в СИ? Какая связь между магнитной восприимчивостью и проницаемостью в этой системе единиц?
15. Каким условиям удовлетворяют векторы индукции и напряженности магнитного поля на границе раздела двух однородных и изотропных магнетиков?
16. Чему равна энергия магнетика во внешнем магнитном поле? Напишите выражение для энергии взаимодействия магнитного эллипсоида с внешним однородным магнитным полем.

17. Чему равна собственная энергия магнетика (энергия магнетика в собственном магнитном поле)? Напишите выражение для собственной энергии однородно намагниченного эллипсоида.
18. Как определить силу и вращающий механический момент, действующие на магнетик во внешнем магнитном поле?
19. Какова микроскопическая природа диамагнетизма? Что вы можете сказать о магнитной восприимчивости диамагнетиков?
20. Какова микроскопическая природа парамагнетизма? Что вы можете сказать о магнитной восприимчивости парамагнетиков?
21. Что понимают под термином «ферромагнитный домен»? Как намагниченность и магнитная восприимчивость ферромагнетика зависят от напряженности магнитного поля? Какие процессы происходят в ферромагнетике при его намагничивании и перемагничивании? Чем обусловлен магнитный гистерезис?
22. Какими свойствами должен обладать ферромагнетик, используемый для магнитостатической защиты? Какими свойствами должен обладать ферромагнетик, применяемый в качестве постоянных магнитов?
23. Известно, что магнитной восприимчивость слабомагнитных веществ (парамагнетиков и диамагнетиков) значительно меньше единицы. Как это сказывается на магнитной восприимчивости слабомагнитного тела? В каком случае форма слабомагнитного тела не имеет значения и в каком случае она является существенной?
24. Если магнитная восприимчивость магнитомягкого ферромагнетика достаточно велика, то такой ферромагнетик может служить ферромагнитным экраном (аналог проводника в электростатике). Будет ли такой ферромагнетик осуществлять роль магнитостатического экрана в любом по величине магнитном поле? Если нет, то укажите причину ограничения.
25. Если тонкое алюминиевое кольцо подвесить на нити, то что будет происходить с кольцом, если к нему приближать северный полюс постоянного магнита? Изменится что-нибудь в поведении кольца, если приближать южный полюс этого магнита?

Глоссарий

1 . Гистерезис – свойство систем (физических, биологических и т. д.), мгновенный отклик которых на приложенные к ним воздействия зависит в том числе и от их текущего состояния, а поведение системы на интервале времени во многом определяется её предысторией.

2. Диамагнетик (от греч. dia – расхождение и магнетизм) – свойство веществ намагничиваться навстречу приложенному магнитному полю.

3. Коэрцитивная сила – значение напряжённости магнитного поля, необходимое для полного размагничивания ферро- или ферромагнитного вещества

4. Магнитный гистерезис – явление зависимости вектора намагничивания и вектора напряжённости магнитного поля в веществе не только от приложенного внешнего поля, но и от предыстории данного образца.

5. Магнитный момент – основная величина, характеризующая магнитные свойства вещества

6. Намагниченность – характеристика магнитного состояния вещества, определяемая отношением магнитного момента тела к его объёму.

7. Остаточная намагниченность – намагниченность, которую имеет ферромагнитный материал при напряжённости внешнего магнитного поля, равного нулю

8. Парамагнетик – вещество, магнитные моменты атомов которого в отсутствие внешнего поля равны нулю, т.к. магнитные моменты всех электронов атома взаимно скомпенсированы (например, инертные газы, водород, азот, NaCl и др.).

9. Петля гистерезиса – графическое изображение зависимости физической величины, характеризующей состояние тела, от физической величины, характеризующей внешние условия, при периодическом изменении последней, когда состояние тела неоднозначно зависит от внешних условий.

10. Прецессия – явление, при котором момент импульса тела меняет своё направление в пространстве под действием момента внешней силы.

11. Точка (температура) Кюри – температура, выше которой ферромагнитное тело становится парамагнитным.

12. Ферромагнетик – вещество, которое (при температуре ниже точки Кюри) способно обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля.

Учебное издание

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания к выполнению лабораторной работы
2-18 по курсу «Общая физика» для студентов всех направлений и
специальностей

Составители

СЫПЧЕНКО Владимир Сергеевич

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном
соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 10.12.2016. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.
Заказ . Тираж 50 экз.

Национальный исследовательский Томский политехнический
университет

Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета

сертифицирована

NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO
9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru