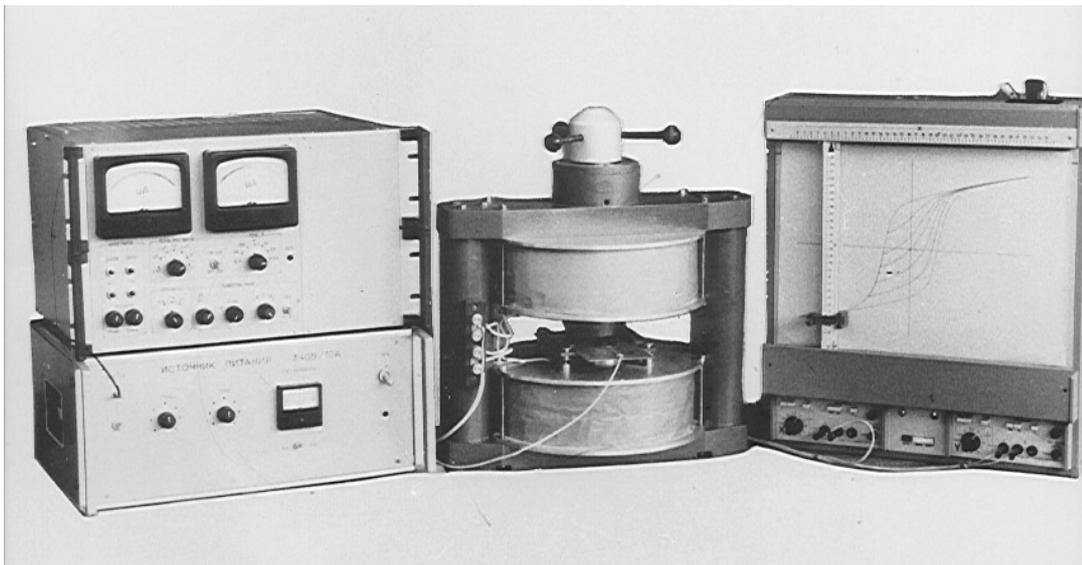


ГИСТЕРИОГРАФ

Прибор для контроля статических магнитных характеристик
магнитомягких материалов



Описание и инструкция по эксплуатации

СОДЕРЖАНИЕ

ГИСТЕРИОГРАФ.....	1
НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИБОРА.....	4
ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	5
Измерительный блок.....	5
Измерение индукции, намагниченности	5
Измерение намагничивающего поля	5
Развертка поля.....	5
Электромагнит.....	5
Источник питания электромагнита.....	6
Комплект датчиков	6
Графопостроитель.....	7
ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА.....	8
НАЗНАЧЕНИЕ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТОВ ИНДИКАЦИИ.....	10
КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА И ЕГО ОСНОВНЫХ ЧАСТЕЙ.....	13
Электромагнит.....	13
Источник питания электромагнита.....	15
Измерительный блок.....	15
ВВОД ПРИБОРА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ.....	18
ПОРЯДОК ВКЛЮЧЕНИЯ И ВЫКЛЮЧЕНИЯ ПРИБОРА.....	20
ПОРЯДОК РАБОТЫ.....	21
Требования к образцу.....	21
Выбор датчика и другие практические рекомендации.....	21
Подключение измерительного датчика с компенсирующей катушкой.....	22
Установка “нуля” интегратора.....	22
Проведение измерений.....	23
Подготовка к работе графопостроителя.....	23
Разметка осей координат.....	23
Регистрация петли гистерезиса.....	23

Намотка измерительной катушки на образец.....25

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.....26

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСШТАБОВ ПО ОСЯМ КООРДИНАТ.....26

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА.....26

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА ПО КРИВЫМ, ЗАПИСАННЫМ В КООРДИНАТАХ
 $4\pi M - H$27

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА ПО КРИВЫМ, ЗАПИСАННЫМ В КООРДИНАТАХ $B - H$29

ИЗМЕРЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭТАЛОННОГО ОБРАЗЦА.....29

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ.....30

Назначение и область применения прибора

Гистериограф предназначен для измерения статических магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий из них. Прибор позволяет производить регистрацию предельных и непредельных гистерезисных циклов, кривых «возврата» и определять основные параметры петли гистерезиса H_c^M , H_c^B , B_r , $(BH)_{max}$ и другие. Прибор прост в обращении; время регистрации петли гистерезиса составляет не более 1 - 3 минут.

Гистериограф необходим при разработке и производстве изделий из магнитомягких материалов, может применяться для входного контроля при производстве устройств, использующих постоянные магниты. Наиболее близкими аналогами являются приборы фирм *LDJ Electronics* (США), *Riken Denshi* (Япония), *Magnet Physik* (Германия).

В состав прибора входят измерительный блок, электромагнит, источник питания электромагнита, комплект датчиков магнитного потока. (Графопостроитель приобретается отдельно.) Общий вид прибора представлен на *Рис.1*. Измерительный блок имеет модульную конструкцию. В него входят: измеритель магнитного поля с датчиком Холла, аналоговый интегратор для измерения магнитного потока и устройство управления разверткой намагничивающего поля. Измерение индукции образца осуществляется с использованием датчиков магнитного потока двух типов: 1) катушка, намотанная непосредственно на образец; 2) датчик с измерительной катушкой и катушкой компенсации воздушного потока.

Образцы могут иметь форму цилиндра или параллелепипеда; при использовании датчиков с катушкой компенсации возможно также измерение образцов в форме кольца. Во всех случаях необходимо наличие плоских граней, перпендикулярных направлению намагничивания. Размеры образцов – до 60 мм в диаметре и от 4 до 25 мм по высоте.

Проведение измерений на образцах сложной формы, не имеющих плоских граней, также возможно, но требует изготовления соответствующих дополнительных приспособлений.

Основные характеристики

Измерительный блок

Измерение индукции, намагниченности

Метод: интегрирование ЭДС измерительной катушки, охватывающей образец.

Пределы измерения:

$3 \cdot 10^4$; 10^5 ; $3 \cdot 10^5$; 10^6 ; $3 \cdot 10^6$; 10^7 ; $3 \cdot 10^7$ Максвелл· виток.

Погрешность измерения – не более 1% полной шкалы.

Дрейф за 1 мин - не более 300 Максвелл· виток.

Измерение намагничивающего поля

Метод: измерение поля датчиком Холла.

Пределы измерения:

30 Э ; 100 Э ; 300 Э ; 1 кЭ ; 3 кЭ ; 10 кЭ ; 30 кЭ .

Погрешность измерения – не более 1% полной шкалы.

Развертка поля

Время развертки от 10 сек до 5 мин. Автоматическое замедление развертки на крутых участках петли гистерезиса.

Размеры измерительного блока $485 \times 440 \times 275$ мм³.

Электромагнит

Вертикальный изменяемый зазор, естественное воздушное охлаждение. Полюсные наконечники – сменные.

Диаметр основания полюса 100 мм.

Диаметр полюса (для наконечников, поставляемых в комплекте) 80 мм.

Диапазон изменения зазора 0 – 30 мм;

Поле в зазоре:

10 мм - 15 кЭ

5 мм - 20 кЭ

Сопротивление холодных обмоток при параллельном включении - 4 Ом.

Мощность рассеяния - 0.5 кВт.

Габаритные размеры - 450 × 320 × 510 мм³.

Вес (приблизительно) - 120 кг.

Источник питания электромагнита

Линейный биполярный регулируемый стабилизатор тока.

Пределы изменения выходного тока ± 10 А.

Пределы изменения выходного напряжения ± 40 В.

Питание от однофазной сети переменного тока, 220 В, 50 Гц.

Потребляемая мощность не более 500 ВА.

Размеры 485 × 380 × 210 мм³.

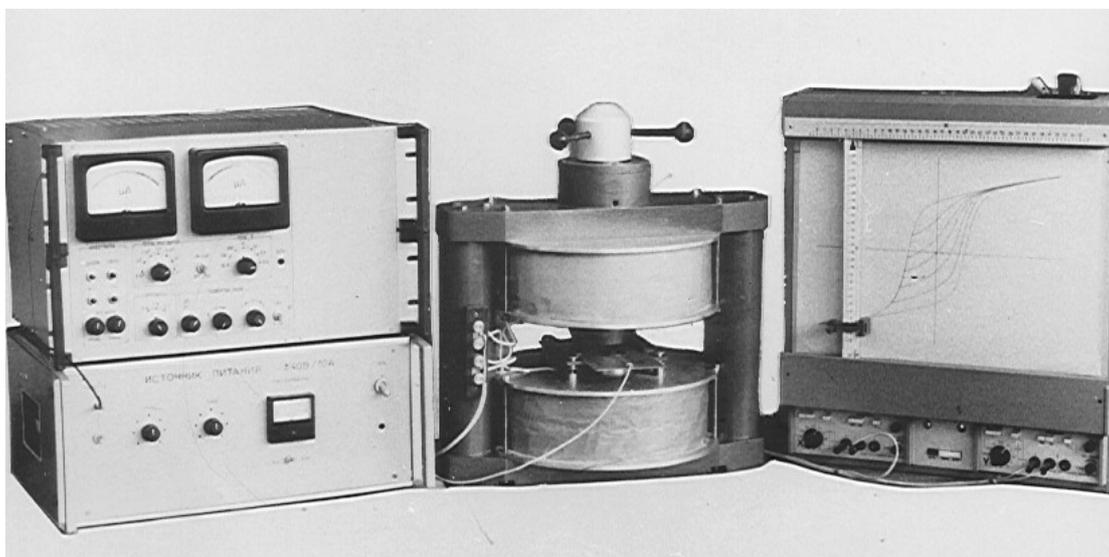


Рис. 1. Внешний вид прибора.

Комплект датчиков

Комплект датчиков включает:

- холловский датчик магнитного поля;
- три датчика магнитного потока для образцов диаметром до 16 мм, до 26 мм и до 45 мм.

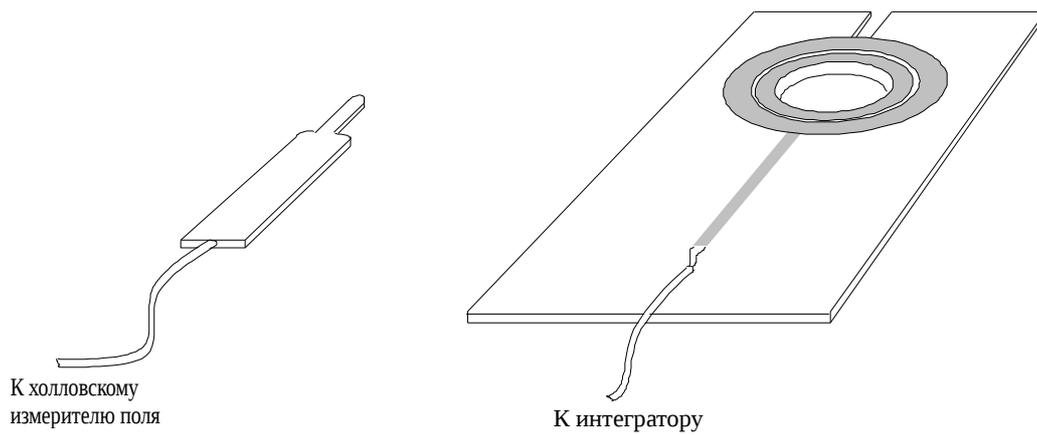


Рис. 2. Датчик Холла (слева) и датчика магнитного потока (справа).

Графопостроитель

Рекомендуется применение двухкоординатного самопишущего прибора типа НЗ07 или аналогичного.

Принцип работы прибора

Структурная схема прибора приведена на Рис. 3 и содержит следующие функциональные узлы:

- электромагнит с источником питания для создания поля, намагничивающего образец;
- холловский измеритель поля с датчиком Холла – для измерения величины намагничивающего поля;
- аналоговый интегратор с датчиком потока (измерительной катушкой) – для измерения магнитного потока в образце;
- устройство управления разверткой поля.

При изменении намагничивающего поля изменяется индукция образца, что приводит к возникновению электродвижущей силы в измерительной катушке. Выходной сигнал измерительной катушки после его интегрирования пропорционален индукции образца; этот сигнал подается на Y – вход графопостроителя. На X – вход графопостроителя поступает сигнал с холловского измерителя поля; таким образом, при изменении поля на графопостроителе отображается зависимость индукции образца от величины намагничивающего поля.

Принцип измерения индукции образца основан на законе электромагнитной индукции:

$$u(t) = -n \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где $u(t)$ – напряжение в измерительной катушке, намотанной на образец; n – количество витков; Φ – поток, равный произведению индукции на площадь:

$$\Phi = B \cdot S_0. \quad (2)$$

Интегрирование $u(t)$ с помощью аналогового интегратора дает $\Phi(t)$ плюс некоторая константа, которая определяется зарядом емкости интегратора в момент начала измерения; при правильном «обнулении» интегратора константа интегрирования равна нулю. Таким образом, величина выходного сигнала интегратора с точностью до постоянной величины пропорциональна индукции в образце.

При наличии зазора между образцом и измерительной катушкой вместо уравнения (2) справедливо:

$$\Phi = B \cdot S_0 + H \cdot S', \quad (3)$$

где S' – площадь зазора между катушкой и образцом, H – намагничивающее поле.

Вместо катушки, намотанной на образец, может быть использован специальный датчик, содержащий, кроме измерительной катушки, катушку компенсации. Такие датчики входят в состав прибора.

Датчик имеет две коаксиальные включенные навстречу друг другу катушки, площади S_1 и S_2 и числа витков n_1 и n_2 которых подобраны таким образом, чтобы в однородном внешнем поле суммарный поток был равен нулю:

$$n_1 \cdot S_1 = n_2 \cdot S_2.$$

При наличии образца полный поток в катушках равен:

$$\Phi = (n_1 - n_2) \cdot S_0 \cdot (B - H) \quad (4)$$

То есть, при применении датчика с компенсирующей катушкой измеряется величина $(B - H) \cdot S_0$ или $4\pi M \cdot S_0$, где M – намагниченность образца, S_0 – площадь его поперечного сечения. Разность числа витков $n = n_1 - n_2$ представляет собой калибровочную характеристику датчика, указанную на каждом датчике.

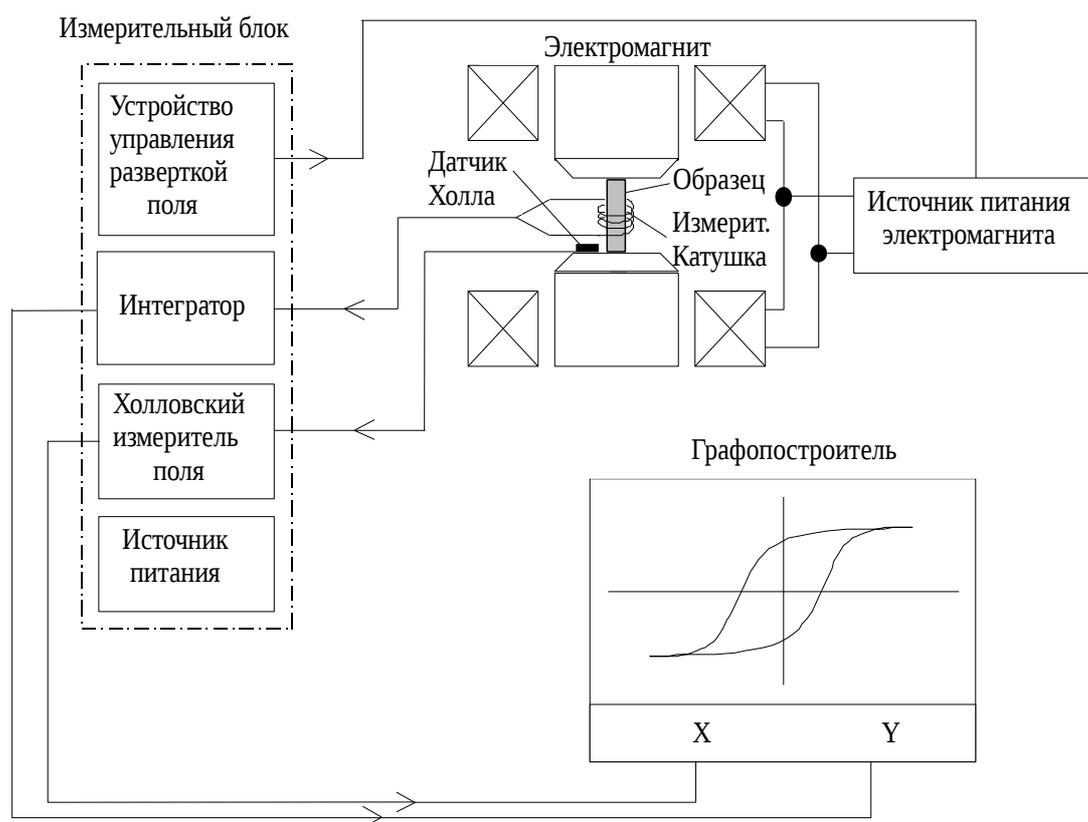


Рис. 3. Структурная схема прибора.

Назначение органов управления и элементов индикации

Измерительный блок (Рис. 4) имеет следующие органы управления и элементы индикации:

стрелочный измерительный прибор канала B (слева);

стрелочный измерительный прибор канала H (справа);

переключатель “ПОТОК” – выбор предела измерения канала (в *Максвеллах на виток*);

переключатель “ПОЛЕ” – выбор пределов измерения намагничивающего поля (в *Эрстедах*);

переключатель “ON LINE – OFF LINE” - определяет режим выбора пределов измерения каналов B и H ; положению “OFF LINE” соответствует ручная установка пределов, положению “ON LINE” – автоматическая (только для автоматизированного исполнения прибора);

переключатель “САМОПИСЕЦ” - определяет режим работы самопишущего прибора:

крайнее левое положение (без маркировки) - разметка осей координат;

“Н – М” – измерение поля и намагниченности (индукции);

“Т – М” – измерение температуры и намагниченности (индукции) – при наличии встроенного терморегулятора;

“X – Y” – управление самописцем от встроенного микропроцессорного контроллера – для автоматизированного исполнения прибора;

тумблер “АВТ. – РУЧН” – выбор режима развертки; автоматическое управление - только для автоматизированного исполнения прибора;

ручка “Н max” – задание максимальной величины намагничивающего поля;

ручка “- $\swarrow^0 \searrow$ +” – управление скоростью и направлением развертки поля;

ручка “ $\frac{dM}{dt}$ ” – регулировка замедления развертки при прохождении крутых участков петли гистерезиса;

кнопка “СБРОС” – установка в нуль выходного сигнала интегратора;

кнопка “ДРЕЙФ” – увеличение в 10 раз чувствительности измерительного прибора канала B ; предназначена для точной установки «нуля» интегратора;

кнопки “←”, “→” – уменьшение (увеличение) выходного сигнала интегратора;

ручки “УСТ. НУЛЯ” – установка нуля (компенсация дрейфа) интегратора;

тумблер “СЕТЬ” – включение или выключение измерительного блока; расположен на задней панели измерительного блока.

Источник питания электромагнита (Рис. 5) имеет следующие органы управления и элементы индикации:

тумблер “СЕТЬ” – включение источника питания;

розетка “Вход ± 10 В” - вход управляющего сигнала;

тумблер “Вход ± 10 В” – выбор режима управления выходным током; верхнему положению тумблера соответствует управление внешним сигналом, нижнему – ручное управление;

ручки “ГРУБО”, “ТОЧНО” – регулировка выходного тока в режиме ручного управления.

измерительный прибор на передней панели – индикация выходного тока/напряжения.

тумблер “10 А – 50 В” – определяет режим работы (шкалу) измерительного прибора.

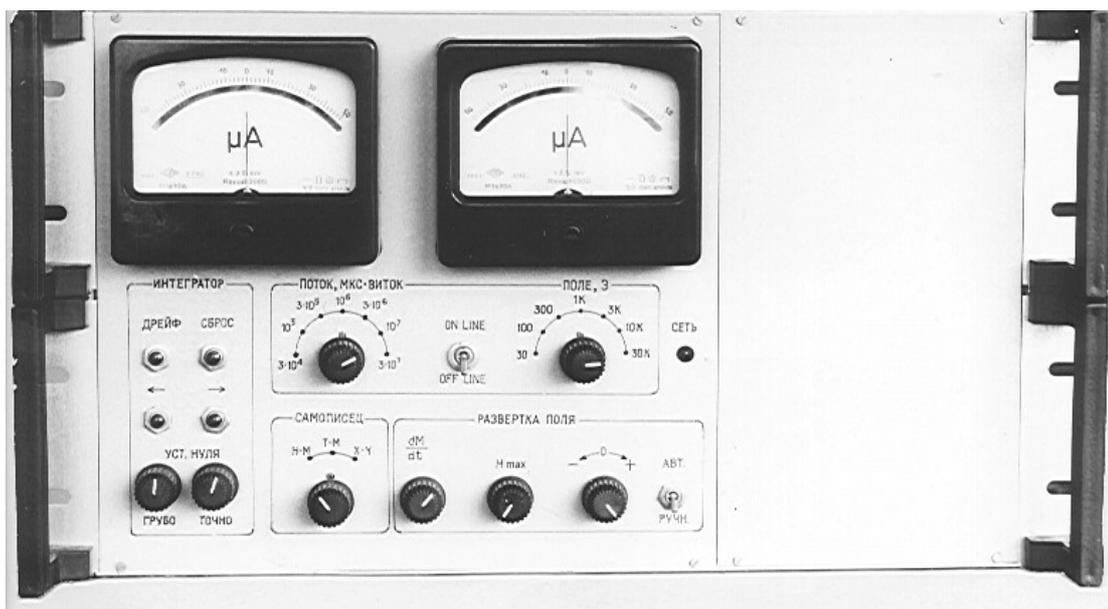


Рис. 4. Вид передней панели измерительного блока.



Рис. 5. Вид передней панели источника питания.

Конструкция прибора и его основных частей

Электромагнит

Электромагнит состоит из ярма, нижнего неподвижного и верхнего подвижного полюсов и двух катушек. Регулировка зазора электромагнита в диапазоне 0 – 30 мм осуществляется вращением расположенной сверху рукоятки. Шаг ходового винта – 2 мм, то есть при повороте на оборот рабочий зазор электромагнита изменяется на 2 мм. Катушки намотаны медным проводом диаметром 1,9 мм и имеют сопротивление около 8 Ом каждая. Схема подключения приведена на Рис.5. При подключении электромагнита к источнику питания катушки соединяются параллельно.

Полюсные наконечники – сменные, крепятся к полюсам с помощью резьбовых соединений. Диаметр полюсных наконечников, поставляемых в комплекте, 80 мм.

Внимание! В случае смены полюсных наконечников следует иметь в виду возможность свинчивания верхнего полюса с ходового винта. Необходимо убедиться вращением полюса против часовой стрелки, что резьбовое соединение верхнего полюса и ходового винта затянуто “до отказа”.

Зависимости поля в рабочем зазоре от тока и длины зазора показаны на Рис.6.

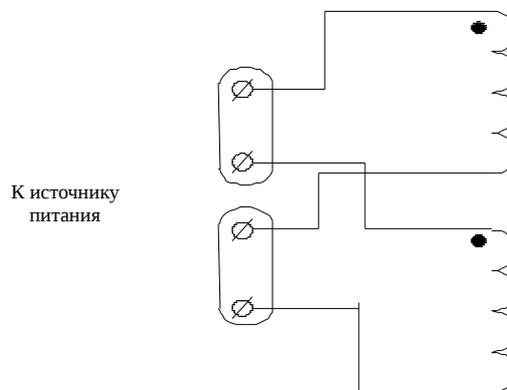


Рис. 6. Схема подключения катушек электромагнита.

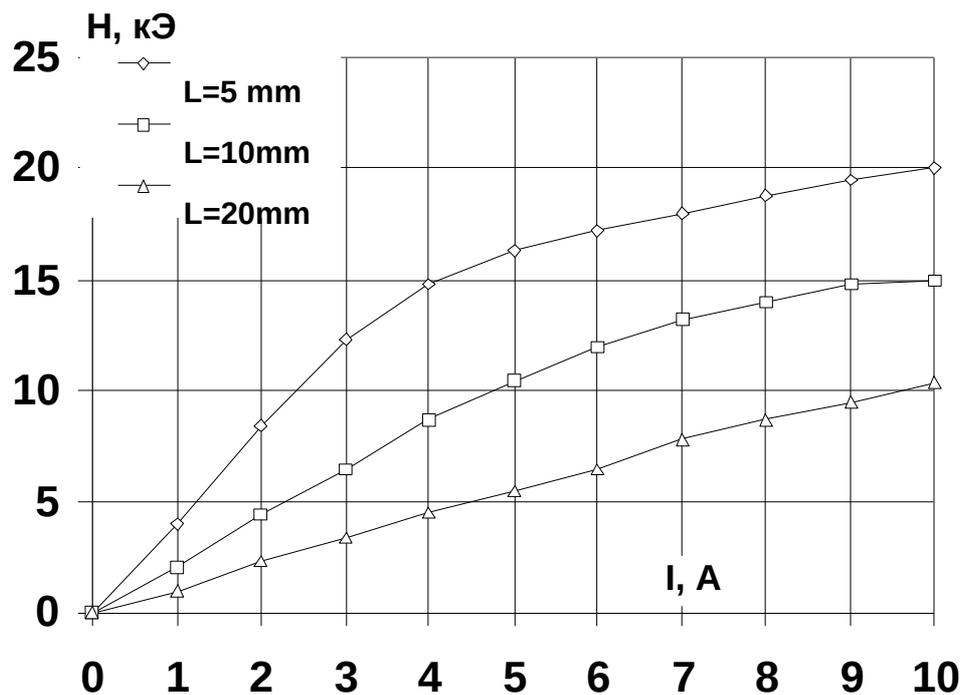


Рис. 7. Поле в рабочем зазоре электромагнита от тока для различной длины зазора $L=5,10,20$ мм.

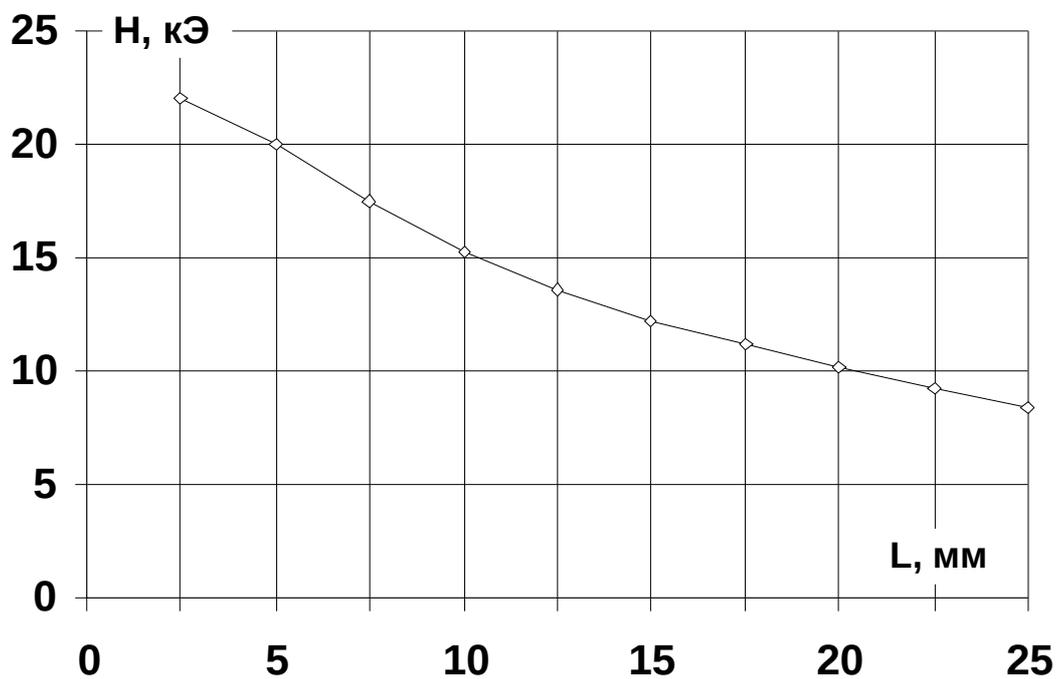


Рис. 8. Поле в рабочем зазоре электромагнита при токе 10 А в зависимости от длины зазора.

Источник питания электромагнита

Источник питания построен по принципу линейного стабилизатора тока, рассчитан на работу с нагрузкой $4\ \text{Ом}$ и максимальный ток нагрузки $10\ \text{А}$. Импульсные и тиристорные схемы не применяются из-за создаваемых ими помех, ухудшающих работу измерительной аппаратуры.

Выходной ток может изменяться от максимального положительного значения $+10\ \text{А}$ до максимального (по абсолютной величине) отрицательного значения $-10\ \text{А}$ с плавным переходом через нуль; при изменении полярности никакие переключения не производятся, что обеспечивает непрерывность регистрируемых кривых во всем диапазоне измерения.

Предусмотрено ручное управление выходным током от ручек на передней панели **“ГРУБО”**, **“ТОЧНО”** (тумблер **“Вход $\pm 10\ \text{В}$ ”** - опущен), и дистанционное управление внешним аналоговым сигналом, поступающим через розетку **“Вход $\pm 10\ \text{В}$ ”** (тумблер **“Вход $\pm 10\ \text{В}$ ”** - поднят).

Стрелочный индикатор на передней панели, в зависимости от положения расположенного под ним переключателя **“10 А – 50 В”**, показывает либо выходной ток (полная шкала прибора $\pm 10\ \text{А}$), либо выходное напряжение (полная шкала прибора $\pm 50\ \text{В}$).

Источник питания имеет схему для защиты от повреждения энергией, запасенной магнитным полем электромагнита, благодаря которой намагничивающее поле можно изменять достаточно быстро, не подвергая при этом источник опасности выхода из строя.

Источник питания содержит: трансформатор питания; выпрямитель с выходными напряжениями около $\pm 50\ \text{В}$; два блока мощных выходных транзисторов, соединенных параллельно по 8 штук в каждом из блоков, расположенных на радиаторе. Охлаждение выходных транзисторов производится вентилятором, установленным на задней стенке прибора. Кроме того, в источнике имеется плата предварительного усилителя, предназначенного для усиления сигнала управления мощными транзисторами со схемой защиты выходных транзисторов, а также плата регулятора тока, осуществляющая стабилизацию выходного тока источника.

Стабилизация тока производится сравнением напряжения на шунте, включенном последовательно с нагрузкой, и напряжения задаточного тока. Шунт представляет собой фигурную пластину из константана и имеет сопротивление $0,05\ \text{Ом}$. В качестве задатчика тока служат либо переменные резисторы, расположенные на передней панели источника питания, либо внешний управляющий сигнал, поступающий через розетку **“Вход $\pm 10\ \text{В}$ ”**.

Измерительный блок

Измерительный блок имеет модульную конструкцию. Модули измерительного блока устанавливаются с задней стороны прибора (Рис.6).

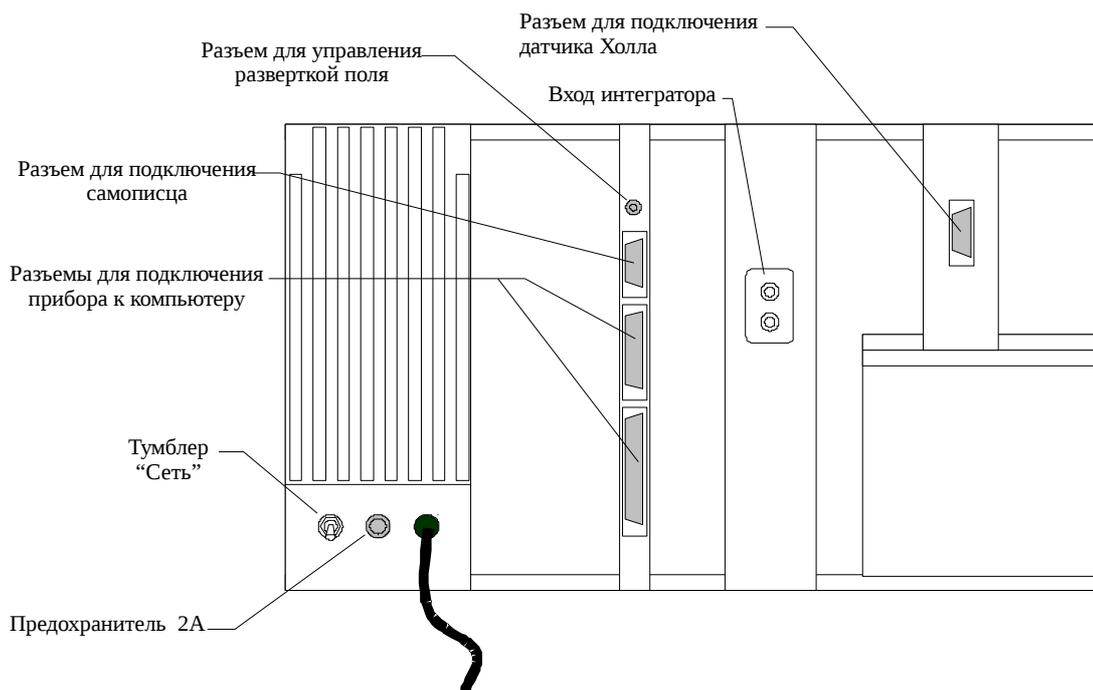


Рис. 9. Расположение модулей измерительного блока. Вид сзади.

В состав измерительного блока входят следующие устройства:

- *Модуль источника питания* предназначен для питания остальных модулей измерительного блока. Он содержит трансформатор питания, выпрямители и линейные стабилизаторы напряжения. Выходные напряжения источника питания $+5\text{ В}$, $+15\text{ В}$, -15 В . Тумблер “СЕТЬ” и сетевой предохранитель расположены на задней стенке источника.
- *Модуль управления* служит для выбора пределов измерения каналов B и H и управления разверткой намагничивающего поля. Он имеет разъемы для внешних подключений (графопостроителя и источника питания электромагнита).
- *Аналоговый интегратор* предназначен для интегрирования ЭДС, возникающей в измерительной катушке (датчике) в процессе перемагничивания образца. Выходное напряжение интегратора пропорционально магнитному потоку в измерительной катушке (датчике).

Интегратор имеет постоянную времени равную 30 мс и входное сопротивление 150 кОм .

Аналоговый интегратор содержит следующие узлы:

- усилитель постоянного тока МДМ (модулятор-демодулятор) в экране;
- интегрирующий конденсатор с диэлектриком из полистирола;
- масштабирующий усилитель постоянного тока с регулируемым коэффициентом усиления ($1, 3, 10, 30, 100, 300, 1000$);

— схему сброса с герконом и схему установки нуля.

Собственно интегратором является высококачественный МДМ-усилитель, между входом и выходом которого включена интегрирующая емкость 0,2 мкФ, а входной сигнал подается через сопротивление 150 кОм. Входные цепи МДМ-усилителя выполнены с использованием тепловых шунтов, чтобы свести к минимуму влияние термо-ЭДС в местах соединений.

Выходной сигнал интегратора усиливается масштабирующий усилителем. Масштабирующий усилитель имеет электронное (бесконтактное) переключение коэффициента усиления.

«Сброс» интегратора производится замыканием с помощью геркона интегрирующей емкости.

- *Холловский измеритель поля* предназначен для измерения величины намагничивающего поля. Он рассчитан на работу с датчиком Холла типа ПХЭ 607118 или аналогичного. На токовые входы преобразователя Холла подается через трансформатор переменный сигнал частотой 2,5 кГц в форме меандра. Переменный сигнал с холловских контактов датчика, пропорциональный измеряемому полю, поступает на вход предварительного усилителя с низким уровнем шума, снабженный схемой компенсации напряжения смещения датчика Холла, затем усиливается усилителем с переключаемым коэффициентом усиления (1, 3, 10, 30, 100, 300, 1000) и подвергается синхронному детектированию. Продетектированный сигнал усиливается усилителем постоянного тока с коэффициентом усиления 1, 10, 100. Так же, как в интеграторе, в холловском измерителе поля используется электронное (бесконтактное) переключение усиления.

Ввод прибора в эксплуатацию

Установите электромагнит на прочном основании, выдерживающем нагрузку не менее 200 кг. Слева от электромагнита поместите источник питания, на нем установите измерительный блок. Справа вертикально установите самописец (Рис. 1). Такое расположение обеспечит Вам удобство работы, как в процессе измерения, так и при смене образцов.

При подключении используйте кабели, имеющиеся в комплекте прибора, и руководствуйтесь рисунками.

Соблюдая полярность, подключите электромагнит к клеммам источника питания “ $\pm 40 \text{ В} / 10 \text{ А}$ ”, расположенным на задней панели.

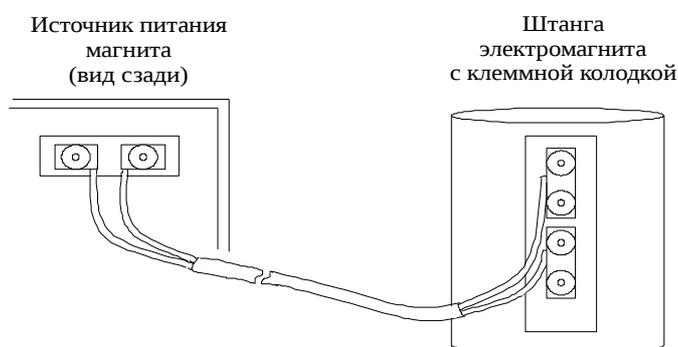


Рис. 10. Подключение электромагнита к источнику питания.

Розетку источника питания “Вход $\pm 10 \text{ В}$ ” подключите к такой же розетке модуля управления (со стороны задней панели измерительного блока) с помощью коаксиального соединительного кабеля. Подключите самописец с помощью кабеля, входящего в комплект прибора.

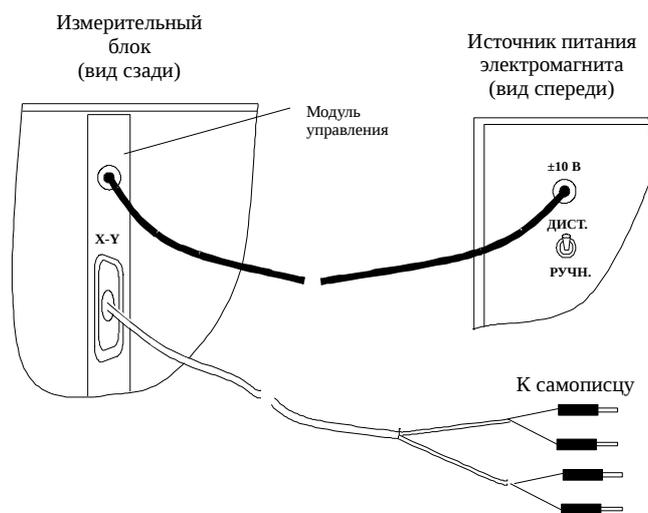


Рис. 11. Подключение координатного самописца и источника питания электромагнита к измерительному блоку.

Полярность подключения определяется цветной маркировкой штекеров (красная метка соответствует плюсу). Разъем датчика Холла подключите к розетке, расположенной на модуле холловского измерителя поля. Сам датчик закрепите на столике электромагнита с помощью прижима, имеющегося на столике (Рис.12).

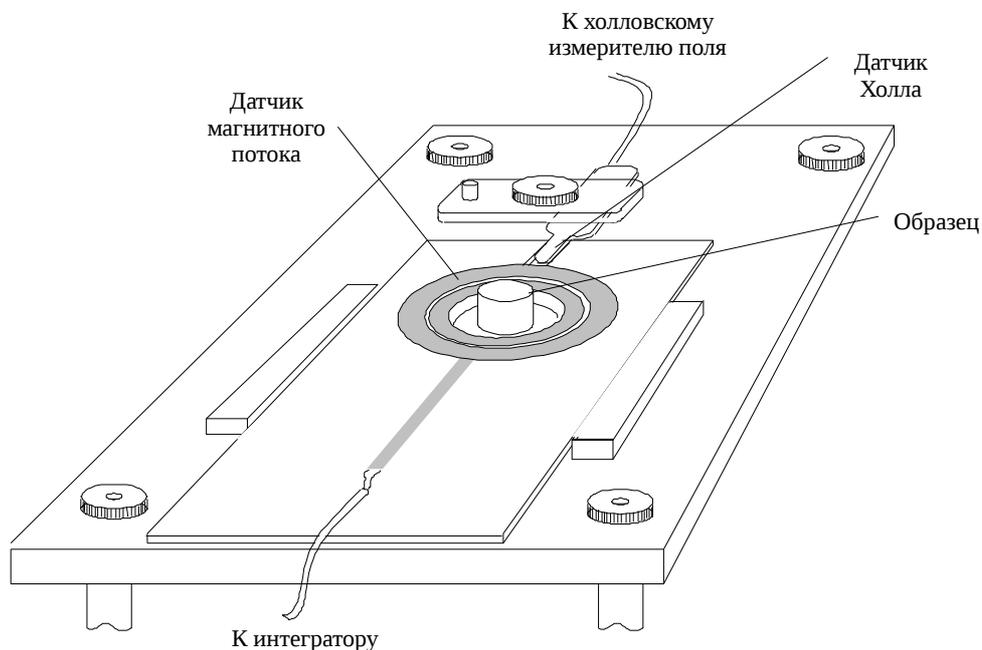


Рис. 12.

Положение образца и датчиков в зазоре электромагнита при измерении.

Подключите один из имеющихся в комплекте прибора датчиков потока к клеммам интегратора со стороны задней панели измерительного блока как показано на рисунке.

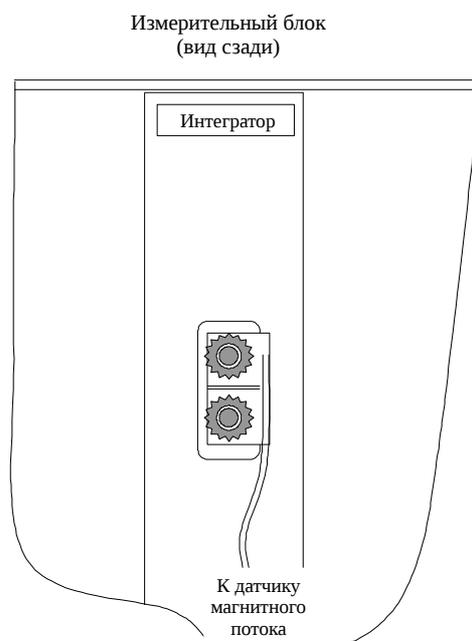


Рис. 13. Подключение датчика магнитного потока к интегратору.

Порядок включения и выключения прибора

Перед включением и выключением необходимо установить органы управления в начальное положение:

- ручку **“Н max”** измерительного блока в крайнее левое положение;
- ручки регулятора тока источника питания **“ГРУБО”** и **“ТОЧНО”** в среднее положение.

Сначала включают измерительный блок, затем источник питания и самописец. Выключение прибора – в обратном порядке. После включения измерительного блока рекомендуется нажимать кнопку «Сброс» интегратора.

Нарушение порядка включения и выключения прибора не допускается!

При работе на наиболее чувствительных пределах канала измерения магнитного потока рекомендуется прогрев измерительного блока в течение 20 – 30 мин.

В процессе работы тумблер источника питания **“Вход $\pm 10В$ ”** должен быть поднят.

Так как прибор не управляется компьютером, то следующие органы в процессе работы должны находиться в указанных положениях:

- тумблер **“ON LINE / OFF LINE”** – опущен;
- тумблер **“РАЗВЕРТКА ПОЛЯ”** в положении **“РУЧН.”**.

Порядок работы

Работа с прибором включает следующие операции, выполняемые по мере необходимости:

- подключение датчика магнитного потока с компенсирующей катушкой (при проведении измерений в осях $M - H$, если возникает необходимость смены датчика);
- намотку измерительной катушки на образец (при проведении измерений в осях $B - H$);
- установку «нуля» интегратора;
- регистрацию петли гистерезиса;
- обработку результатов измерений.

Примечание. Рекомендуется отдавать предпочтение проведению измерений в осях $M - H$ с применением датчика с компенсирующей катушкой как наиболее удобному и точному способу, если нет серьезных оснований для противоположного выбора.

Требования к образцу

Образец должен иметь гладкие плоские параллельные друг другу грани. Свойства образца измеряются в направлении, перпендикулярном этим граням.

Площадь поперечного сечения образца должна быть измерена с достаточной степенью точности; для образцов малого размера рекомендуется выполнять измерения микрометром.

Зазоры между образцом, помещенным в зазор электромагнита, и полюсными наконечниками должны быть минимальными. Наличие зазоров может привести к появлению дополнительной погрешности в результатах измерений.

Высота образца, измеренная в направлении, перпендикулярном плоским граням, должна быть не менее 4 мм; это требование обусловлено высотой катушек датчиков магнитного потока.

При увеличении высоты образца уменьшается величина максимального намагничивающего поля в соответствии с графиком Рис.8.

Выбор датчика и другие практические рекомендации

Необходимо выбирать датчик магнитного потока минимального размера, что уменьшает влияние погрешности раскомпенсации катушек датчика. Для датчика внутренним диаметром 45 мм диапазон измерения ограничен значением поля 10 кЭ; это вызвано краевыми эффектами в зазоре, приводящими к раскомпенсации катушек. При необходимости проведения измерений на образцах диаметром от

45 до 60 мм, пользуйтесь вместо датчика потока катушкой, намотанной на образец.

Следите за правильным положением датчика Холла, чувствительный элемент которого должен всегда находиться на расстоянии не менее 5 мм от края полюса, лучше всего – настолько близко к середине полюса, насколько это позволяет датчик магнитного потока или образец.

Следует избегать приложения каких-либо усилий к катушкам датчиков магнитного потока. Помните, что датчики магнитного потока и датчик Холла **хрупкие** и могут быть легко выведены из строя неаккуратным обращением.

Необходимо обратить внимание на возможное попадание крошки от керамических образцов в зазор между полюсом и измеряемым образцом. Кроме неизбежной ошибки порядка единиц процентов, это вызовет также повреждение (!) поверхности полюсного наконечника, или может привести к повреждению поверхности образца (эталоны).

Подключение измерительного датчика с компенсирующей катушкой

Выберите датчик потока, в соответствии с размерами измеряемого образца и подключите его к клеммам интегратора так чтобы провод, идущий к датчику, был направлен вниз. Установите датчик потока на столике электромагнита до упора и отрегулируйте положение датчика Холла так, чтобы он располагался в пазу платы датчика потока возможно ближе к центру полюса, но при этом не упирался в плату или катушку датчика потока.

Установка «нуля» интегратора

Установку «нуля» интегратора следует проводить после включения прибора и его прогрева, а также периодически в процессе работы, особенно при проведении измерений на наиболее чувствительном пределе измерения потока.

Установка «нуля» интегратора производится следующим образом.

После включения измерительного блока дайте ему прогреться в течение 20 - 30 мин. Установите переключатель **“ПОТОК”** в положение максимальной чувствительности (10^4 Максвелл·виток).

Вынесите датчик потока из зоны действия магнитных полей. Для этого достаточно извлечь датчик из зазора электромагнита и положить его на стол вдали от измеряемых образцов или других источников магнитных полей.

После однократного нажатия кнопки **“СБРОС”** на измерительном блоке удерживайте кнопку **“ДРЕЙФ”** в нажатом состоянии и наблюдайте за движением стрелки измерительного прибора канала *B* в течение 10 – 15 с.

Добейтесь с помощью ручек **“УСТАНОВКА НУЛЯ”**, чтобы при нажатой кнопке **“ДРЕЙФ”** стрелка измерительного прибора канала *B* перемещалась возможно медленнее.

Проведение измерений

Подготовка к работе графопостроителя

Подготовьте графопостроитель (самописец) к работе в соответствии с его инструкцией по эксплуатации. В процессе работы следующие органы управления самописца Н307 (если в качестве графопостроителя используется именно этот прибор) должны находиться в указанных положениях:

- ручки “РЕГ.МАСШТ.” в положении “ОТКЛ.”;
- кнопки “СМЕЩЕНИЕ”, “ $V \setminus mV$ ”, “ЛИН. \ ЛОГ.” отжаты.

Масштаб по осям самописца рекомендуется брать равным **0.25 В/см**, **0.5 В/см** или **1 В/см**.

Разметка осей координат

Установите бумагу в самописец и разметьте оси координат следующим образом.

Поставьте переключатель “САМОПИСЕЦ” измерительного блока в крайнее левое положение без маркировки. Ручками “УСТ. НУЛЯ” самописца проведите оси координат. Установите перо самописца возможно точнее в начало координат. Установите переключатель “САМОПИСЕЦ” в положение “М - Н” и приступайте к проведению измерений.

Регистрация петли гистерезиса

Выберите подходящие пределы измерения потока и поля в соответствии с ожидаемыми свойствами образца.

Проверьте положение ручек управления.

Переключатель “САМОПИСЕЦ” измерительного блока должен находиться в положении “Н - М”. Переключатель “ON LINE/ OFF LINE” должен быть в положении “OFF LINE”, а переключатель “АВТ./ РУЧН” в положении “РУЧН”. На источнике питания электромагнита тумблер, расположенный под гнездом “ВХОД $\pm 10 В$ ”, должен находиться в верхнем положении, что соответствует внешнему управлению источником.

Ручку “ dM/dt ” при проведении измерений на новом образце, со свойствами, значительно отличающимися от предыдущего образца, рекомендуется установить в крайнее левое положение, либо вблизи него. В процессе первого пробного измерения положение этой ручки можно отрегулировать, что обеспечит максимальное удобство при проведении последующих измерений. Если измеряемый образец имеет свойства не слишком отличающиеся от предыдущего, положение этой ручки следует сохранить неизменным.

Установите ручку измерительного блока “Н max” в крайнее левое положение.

Перед регистрацией кривых намагничивания выбранного образца измерьте микрометром его геометрические размеры, необходимые для определения площади поперечного сечения и вычислите ее.

Поднимите верхний полюс на необходимую высоту и поместите измеряемый образец в центре нижнего полюсного наконечника.

Поместите датчик потока вне зоны действия магнитных полей. Нажмите однократно кнопку “СБРОС” на измерительном блоке. Проверьте установку в нуль стрелки измерительного прибора канала B , нажав кнопку “ДРЕЙФ”; при необходимости стрелку установите более точно на нулевое деление, воспользовавшись кнопками “←”, “→”. При измерении на наиболее чувствительном пределе измерения потока рекомендуется перед проведением измерений проконтролировать дрейф интегратора как описано выше.

Установите датчик потока между направляющими столика электромагнита до упора, при этом образец окажется внутри измерительной катушки. Затем опустите верхний полюс магнита до соприкосновения с образцом. Во избежание повреждения образца в процессе измерений слегка поднимите верхний полюс поворотом устройства регулировки зазора электромагнита на угол не более $10 - 15^\circ$.

Установите ручку измерительного блока “- \swarrow 0 \searrow +” в крайнее левое положение. Вращая ручку “ H_{max} ”, по часовой стрелке, доведите поле до требуемого максимального значения. Опустите перо самописца. Управляя направлением и скоростью развертки с помощью ручки “- \swarrow 0 \searrow +”, проведите перемагничивание образца по полному циклу и запись петли гистерезиса. При необходимости выбора наиболее подходящих пределов измерения можно провести пробную регистрацию петли, не опуская перо самописца, выбрав при этом наиболее удобные пределы измерений и масштабы по осям “ X ” и “ Y ” самописца, а также отрегулировать положение ручки “ $\frac{dM}{dt}$ ” так, чтобы обеспечить наиболее удобное для регистрации замедление развертки поля на крутых участках петли гистерезиса.

После регистрации кривых запишите:

- площадь поперечного сечения образца;
- число витков обмотки датчика магнитного потока;
- пределы измерения потока и намагничивающего поля;
- масштабы по осям “ X ” и “ Y ” самопишущего прибора.

Рекомендуется следующая форма записи:

Пример

№ образца	Площадь сечения	Датчик	H	M
10	$7,69 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$	n=100	10кЭ; 0.5В/см	$3 \cdot 10^4$ мкс/виток; 1В/см

Намотка измерительной катушки на образец

Необходимость намотки измерительной катушки на образец возникает при регистрации кривых в осях $B - H$. Так как все параметры петли гистерезиса могут быть найдены по кривым, снятым в координатах $4\pi M - H$, то, как правило, намотки измерительной катушки на образец можно избежать, воспользовавшись датчиком магнитного потока с катушкой компенсации.

Если по каким-либо соображениям все же требуется регистрация кривых в координатах $B - H$, либо применение датчика с катушкой компенсации невозможно, например, из-за того, что размер образца превышает 45 мм, катушка компенсации должна наматываться на образец с учетом следующих требований.

Перед намоткой измерительной катушки не забудьте измерить геометрические размеры образца, необходимые для определения его площади поперечного сечения.

Рекомендуемое количество витков катушки – 10 или более проводом в эмалевой изоляции. Для фиксации обмотки на образце можно использовать липкую ленту. Выводы измерительной катушки должны быть достаточно плотно свиты на длине не менее 15 – 20 см, как показано на Рис. 14.

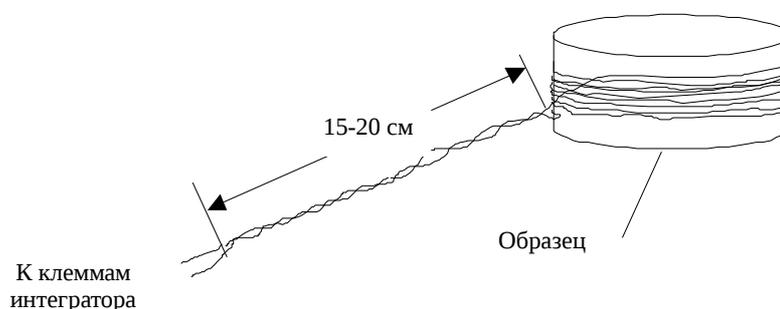


Рис. 14. Намотка измерительной катушки на образец.

Провод должен быть намотан на образец так, чтобы свести к минимуму зазор между обмоткой и образцом. Диаметр провода следует выбирать не более 0,15 мм.

Описанный выше порядок измерений в основном сохраняется, за исключением того, что намотанную на образец катушку, как правило, нельзя снять, чтобы выполнить "сброс" интегратора. В этом случае проводится только одна вертикальная ось, затем с помощью кнопок " \leftarrow ", " \rightarrow " добиваются, чтобы при регистрации кривая не выходила за пределы листа бумаги. Последняя операция заменяет обнуление интегратора и требует пробных проходов петли гистерезиса, за которым удобно следить по стрелочным измерительным приборам. После пробного прохода кривых опускают перо самописца и производят запись. Горизонтальная ось координат проводится при обсчете кривых с учетом симметрии петли гистерезиса.

При проведении измерений с применением измерительной катушки, намотанной на образец, следует иметь в виду погрешность, обусловленную неизбежным зазором между проводом и образцом. Относительная величина этой погрешности увеличивается с уменьшением диаметра образца и может быть оценена по формуле (3). Зазор между измерительной катушкой и образцом не влияет на измерение остаточной индукции, но вносит погрешность в измерение коэрцитивной силы.

Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений включает:

вычисление масштабных коэффициентов для осей координат;

определение основных параметров петли гистерезиса.

Определение масштабов по осям координат

Масштабный коэффициент m_H по горизонтальной оси (оси поля H) вычисляется по формуле:

$$m_H = \frac{K_H \cdot m_X}{10} \text{ Э/см}, \quad (5)$$

где K_H - выбранный предел измерения в Эрстедах, m_X - масштаб по оси "X" самописца в В/см. (Величина масштабного коэффициента, например, 5 Э/см, показывает, что каждый см вдоль оси H на графике соответствует 5 Э.)

Масштабный коэффициент вдоль вертикальной оси (оси потока) вычисляется по формуле:

$$m_\Phi = \frac{K_\Phi \cdot m_Y}{10 \cdot n} \text{ Мкс/см}, \quad (6)$$

где K_Φ - выбранный предел измерения в Максвеллах·виток, m_Y - масштаб по оси "Y" самописца в В/см.

Следует иметь в виду, что при использовании датчика потока с компенсирующей катушкой измеряемой величиной является $B - H = 4\pi M$, где M - намагниченность образца. При использовании датчика в виде катушки, намотанной непосредственно на образец, измеряемой величиной является индукция B .

Масштабный коэффициент $m_{4\pi M}$ или m_B вдоль вертикальной оси в Гс/см находится делением m_Φ на площадь поперечного сечения образца S_0 (в см²):

$$m_{4\pi M} = \frac{m_\Phi}{S_0} \text{ Гс/см} \quad \text{или} \quad m_B = \frac{m_\Phi}{S_0} \text{ Гс/см}. \quad (7)$$

Определение основных параметров петли гистерезиса

Наиболее употребительными являются следующие величины, характеризующие петлю гистерезиса магнито жестких материалов:

- остаточная индукция B_r ;
- коэрцитивная сила по намагниченности H_c^M ;

- коэрцитивная сила по индукции H_c^B ;
- произведение $(BH)_{max}$ или максимальная удельная энергия.

Эти величины определяются после того, как найдены масштабы по осям. Обработка кривых производится по-разному, в зависимости от типа датчика, применяя

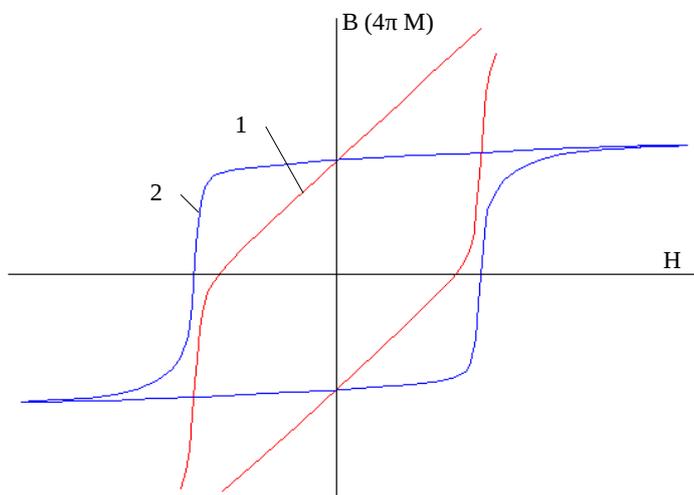


Рис. 15. Измерение петли гистерезиса одного и того же образца разными датчиками.

При измерении с помощью катушки, намотанной на образец, регистрируется зависимость индукции B от намагничивающего поля H (Кривая 1). При измерении датчиком с компенсирующей катушкой регистрируется зависимость величины $B-H=4\pi M$ от намагничивающего поля H (Кривая 2).

Определение основных параметров петли гистерезиса по кривым, записанным в координатах $4\pi M - H$.

В результате измерения с помощью датчика с катушкой компенсации получается зависимость $4\pi M$ от намагничивающего поля H (кривая 2 на).

Определение величин B_r, H_c^M ясно из и не требует пояснений. Для определения величины H_c^B необходимо построить прямую $B=0$. Это можно сделать так: (1) Откладываем по оси H влево и по оси $4\pi M$ вверх отрезки

L_M, L_H , длины которых относятся как $\frac{L_M}{L_H} = \frac{m_H}{m_{4\pi M}}$. (2) Проводим прямую $B=0$ через начало координат и точку $(-L_H, L_M)$.

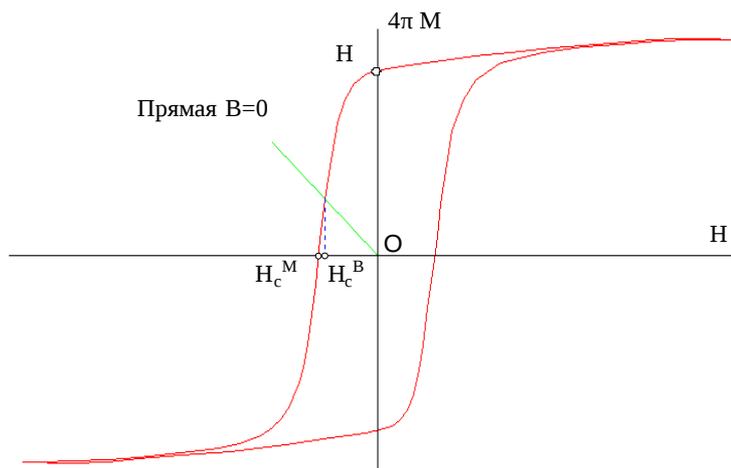


Рис. 16. К определению остаточной намагниченности B_r , коэрцитивной силы по намагниченности H_c^M и коэрцитивной силы по индукции H_c^B .

Определение произведения $(BH)_{max}$ показано на . Сначала проводится прямая $B=0$, как было описано выше. Далее, с помощью линейки подбирается такое положение касательной к "спинке" петли гистерезиса, при котором отрезки от точки касания до оси $4\pi M$ и прямой $B=0$ равны. Точка касания соответствует максимальному произведению $B \cdot H$. Определив координаты этой точки $(4\pi M_1, H_1)$, получим искомую величину $(BH)_{max}$ по формуле:

$$(BH)_{max} = (4\pi M_1 + H_1) \cdot H_1 \quad (8)$$

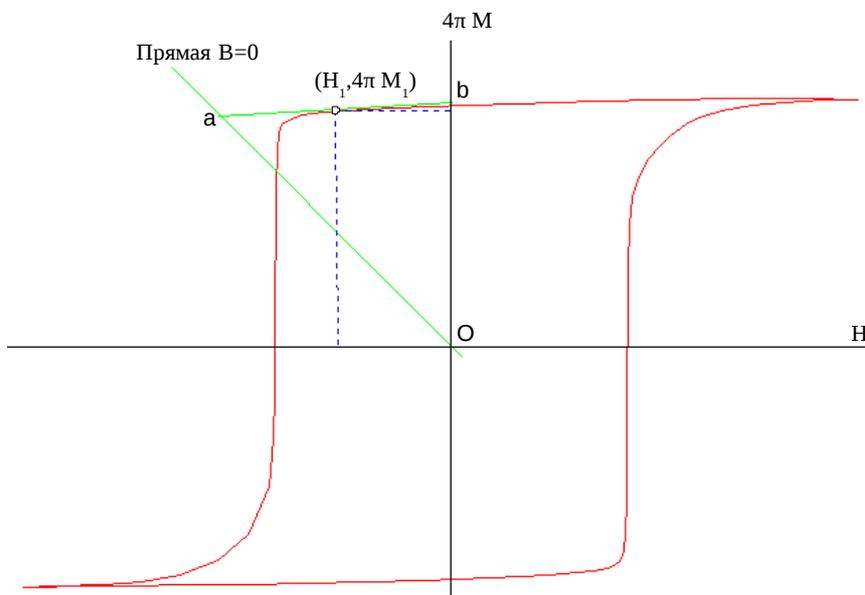


Рис. 17. К определению произведения $(BH)_{max}$.

Отрезок **ab** строится так, чтобы точка касания $(H_1, 4\pi M_1)$ с измеренной кривой была его серединой. Искомая величина $(BH)_{max}$ находится по формуле (8).

Определение основных параметров петли гистерезиса по кривым, записанным в координатах В – Н.

При измерении с использованием измерительной катушки, намотанной на образец, получается зависимость B от намагничивающего поля H (кривая 2 на). Определение величин B_r, H_c^B, H_c^M проводится аналогично описанному выше, с той разницей, что величины B_r, H_c^B находятся непосредственно по точкам пересечения кривой с осями В и Н, а для нахождения H_c^M строится прямая $M=0$.

Определение произведения $(BH)_{max}$ упрощается, так как не требуется проведение дополнительной прямой $B=0$, которая в данном случае совпадает с осью Н. Произведение координат точки касания (B_1, H_1) отрезка с кривой дает непосредственно $(BH)_{max}$, то есть $(BH)_{max} = B_1 \cdot H_1$.

Измерения с применением эталонного образца

Эталонный образец может применяться: 1) для проверки и/или уточнения калибровки датчиков магнитного потока; 2) для проведения измерений, не зависящих от калибровки датчика потока.

В качестве эталонного образца используется никель с чистотой не хуже 99,9%, диаметром ~ 10 мм и высотой ~ 5 мм (Могут использоваться эталонные образцы других размеров). Значение потока насыщения эталонного образца указано на его боковой поверхности. Оно рассчитано исходя из намагниченности насыщения $4\pi M_s = 6076$ Гс при температуре 20°C; этим значением можно пользоваться в диапазоне температур 15 - 25°C.

Кривую намагничивания эталонного образца () снимают на пределах измерения по полю – 3 кЭ, 0,5 В/см, по потоку – в соответствии с выбранным датчиком потока и величиной потока насыщения эталонного образца. Измеренное значение потока насыщения эталонного образца определяется умножением на масштабный коэффициент m_Φ (см. формулу (6)) длины соответствующего отрезка L_S^{ref} на графике (). Это значение следует сравнить с указанным на эталонном образце.

При проведении измерений, не зависящих от калибровки датчика потока, снимают последовательно кривые намагничивания исследуемого образца и эталона с применением *одного и того же* датчика потока, а затем масштабный коэффициент m_Φ для образца находят по формуле:

$$m_\Phi = \frac{(K_\Phi m_Y)^{sample} \cdot \Phi_S^{ref}}{(K_\Phi m_Y)^{ref} \cdot L_S^{ref}} \text{ Мкс/см}, \quad (9)$$

где коэффициенты K_{Φ}, m_{γ} характеризуют выбранные пределы измерения; Φ_S^{ref} - значение потока насыщения эталона; L_S^{ref} - длина отрезка на графике (в см), соответствующего потоку насыщения эталонного образца (Φ).

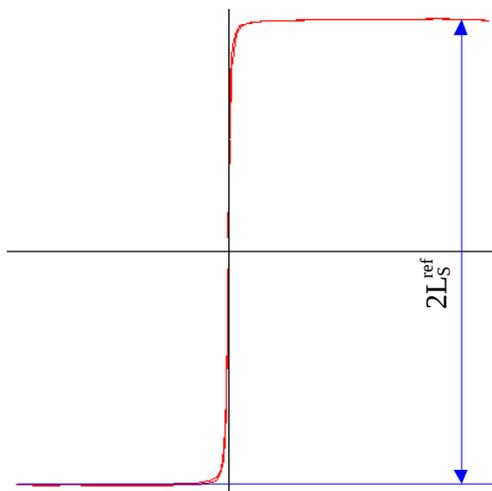


Рис. 18. Кривая намагничивания эталонного образца.

Единицы измерения

В настоящем Описании использовалась гауссова система единиц. Перевод найденных параметров петли гистерезиса в систему единиц СИ производится с помощью хорошо известных коэффициентов:

Величина в гауссовой системе единиц	Величина в системе СИ
1 Э	79,6 А/м
1 Максвелл = 1 Гс · см ²	10 ⁻⁸ Вб
10 ⁴ Гс	1 Тл
Произведение $(BH)_{max}$ 1 МГс · Э	Максимальная удельная энергия: 3,98 кДж/м ³

Вопросы и пожелания:

Лангваген Сергей Евгеньевич, E-mail: lang21@yandex.ru.