

Отчет по лабораторной работе №2: "Гистерезис"

Никитин Илья

12 ноября 2020 г.

Содержание

1	Оборудование	1
2	Задачи	2
3	Определение индуктивности катушки	2
3.1	Теория работы	2
3.2	Ход работы	3
3.3	Анализ данных	4
4	Гистерезис	5
4.1	Теория работы	5
4.2	Ход работы	7
4.3	Анализ данных	7
4.3.1	Первая схема	7
4.3.2	Вторая схема	8
4.3.3	Намагниченность	9
4.3.4	Магнитная восприимчивость	10
4.3.5	Коэрцитивная сила и остаточная намагниченность	11

1 Оборудование

- Цифровой осциллограф Rigol со встроенным генератором синусоидального напряжения
- ЛАТР
- Понижающий трансформатор

- Клемник для сборки электрических цепей
- Ферритовый сердечник
- Резистор с сопротивлением 100 мОм
- Резистор с сопротивлением 95 Ом
- Резистор с сопротивлением 792 кОм
- Конденсатор емкостью около 1 мкФ
- Толстая медная проволока

2 Задачи

- Изготовить катушку индуктивности с ферритовым сердечником и измерить ее индуктивность
- Пронаблюдать петлю магнитного гистерезиса и измерить магнитные параметры материала сердечника: зависимость намагниченности и магнитной восприимчивости образца от поля, коэрцитивную силу и остаточную намагниченность.

3 Определение индуктивности катушки

3.1 Теория работы

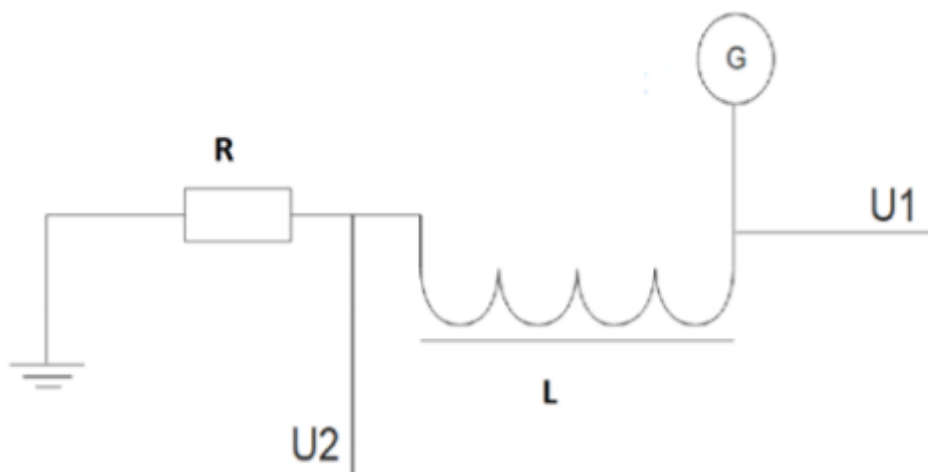


Рис. 1: Схема измерения индуктивности. R – резистор сопротивлением 95 Ом, L – катушка, индуктивность которой требуется измерить, G – выход встроенного генератора осциллографа, U_1 и U_2 – напряжения, измеряемое на первом и втором каналах осциллографа. Земля у генератора и обоих входов осциллографа общая.

С генератора подается синусоидальный сигнал с амплитудой 12 В. В приближении, что резистор имеет только активное сопротивление, а катушка только реактивное можно рассчитать импеданс катушки $Z_L = i\omega L$ зная U_1 , U_2 и R . Полный импеданс всей цепи равен $Z_\Sigma = R + i\omega L$. Тогда модули (и амплитуды) тока и напряжения в цепи связаны следующим образом: $U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. Также из этого легко найти модуль тангенса разности фаз между током и напряжением: $\tan(\phi) = \frac{\omega L}{R}$. Измеряемое напряжение U_2 равно произведению величины тока в цепи на сопротивление R , из этого получим связь между U_1 и U_2 : $\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{1 + (\frac{\omega L}{R})^2}$, из которой можно найти индуктивность L . Из этого соотношения легко понять требования на величину сопротивления R и частоту ω : они должны быть такими, чтобы величина $\frac{\omega L}{R}$ заметно превышала единицу, иначе измерения будут неточными.

3.2 Ход работы

В первую очередь требовалось сделать катушку — намотать медную проволоку на ферритовый сердечник. Мы взяли уже намотанную катушку, измерили ее геометрические размеры. Катушка была намотана из толстой медной проволоки и состояла из 42 витков. Далее была собрана схема (1). С помощью осциллографа были измерены напряжения на катушке для токов на различных частотах, затем определены различные значения выражения $\frac{R}{2\pi} \sqrt{(\frac{U_1}{U_2})^2 - 1}$ при различных значениях частоты.

3.3 Анализ данных

По полученным точкам были построены прямые по МНК и взвешенному МНК, коэффициентом которых является искомая индуктивность катушки.

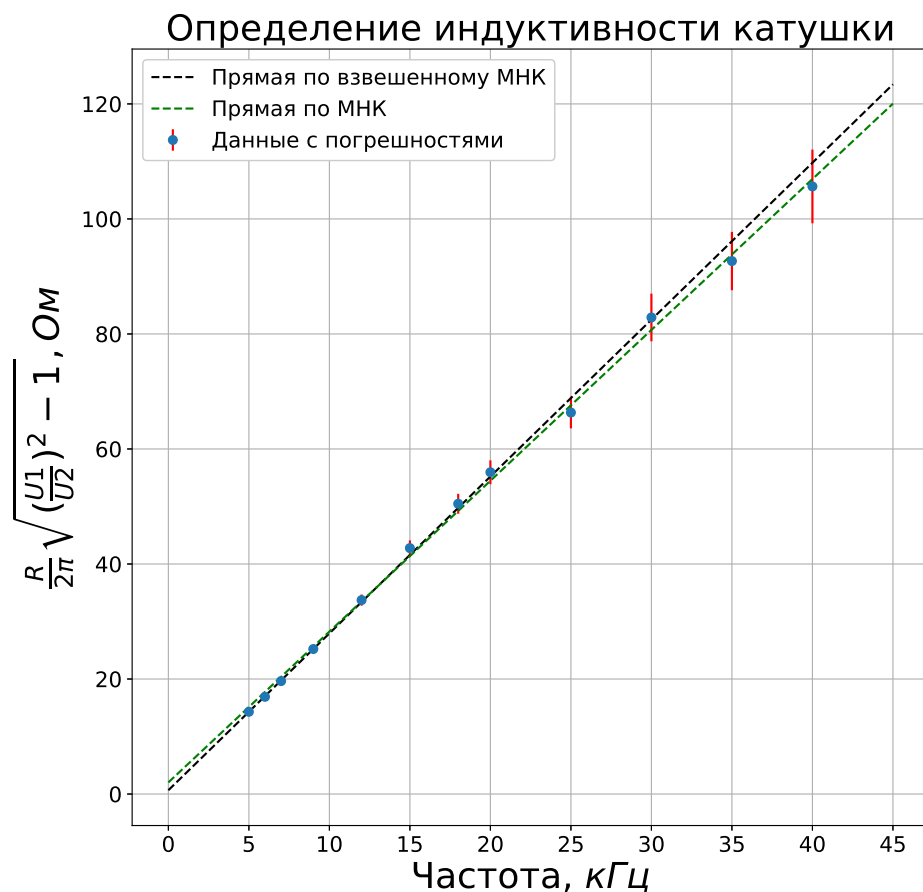


Рис. 2: На графике изображены две прямые: прямая, построенная по экспериментальным данным с помощью МНК и прямая, построенная с помощью взвешенного МНК

За основу был взят график, построенный по взвешенному МНК, так как при предыдущих измерениях индуктивности катушки получившийся результат лучше соотносился с заявленной индуктивностью и показателями точных приборов. Получившаяся индуктивность с учетом погрешностей:

$$L = 2.73 \pm 0.10 \text{ мГн}$$

С помощью вычисленной индуктивности можно найти магнитную проницаемость:

$$\mu = 2.08 \pm 0.08 \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

4 Гистерезис

4.1 Теория работы

Для получения картины магнитного гистерезиса необходимо собрать одну из следующих схем:

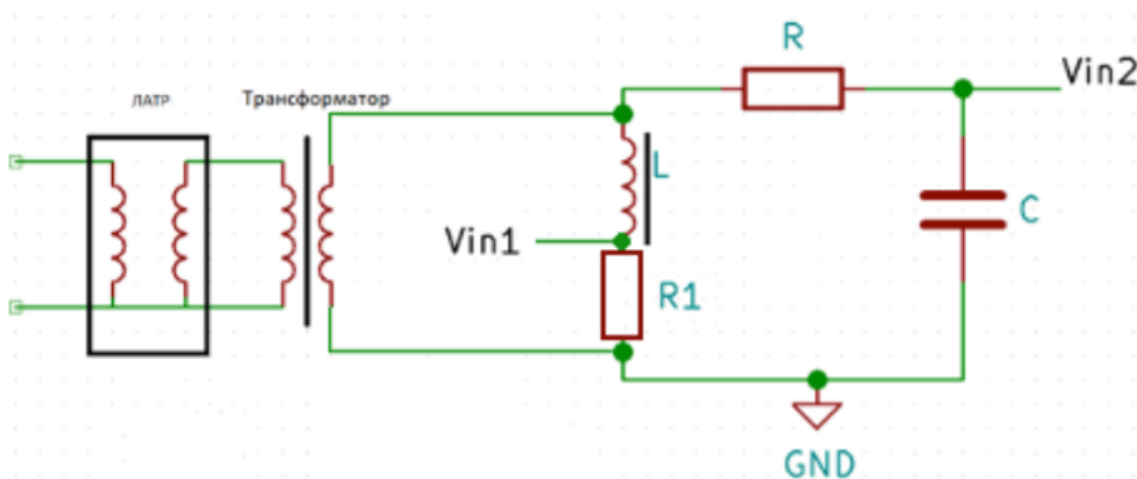


Рис. 3: Схема измерительной цепи с одной катушкой

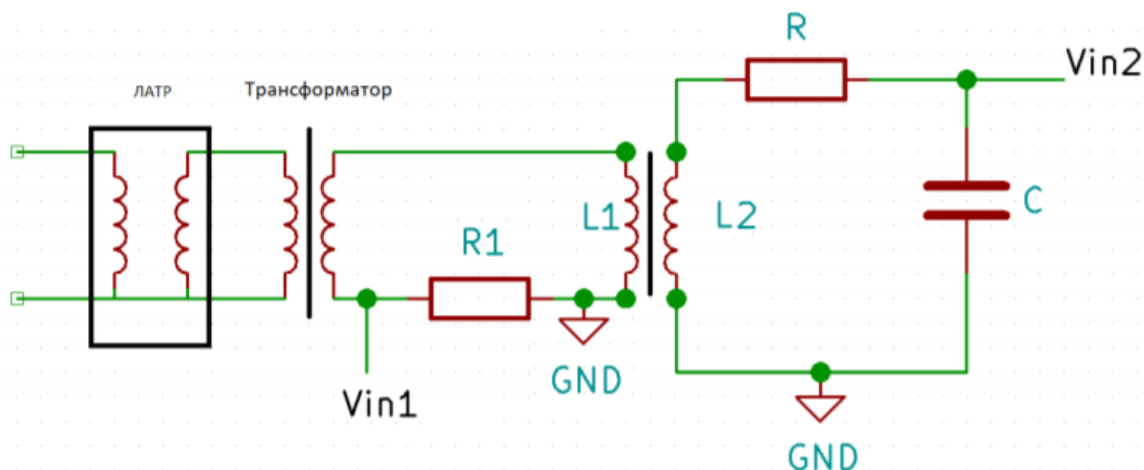


Рис. 4: Схема измерительной цепи с двумя катушками

Принципиально схемы отличаются мало. В обеих ЛАТР (лабораторный автотрансформатор) используется для питания схемы от сети и регулировки силы тока. Понижающий трансформатор нужен для повышения выходного тока и гальванической развязки схемы от сети. Резистор R_1 малого сопротивления ($0.1 - 1$ Ом) необходим для измерения силы тока, текущего через катушку, $L(L1)$ – собственно катушка из медной проволоки, намотанная на образец. Сопротивление R (номиналом 820 кОм) и конденсатор (емкостью в 1 мкФ) образуют интегрирующую цепочку. Напряжение V_{in1} , пропорциональное току через катушку и, соответственно, напряженности поля H в ней, и напряжение V_{in2} , пропорциональное интегралу напряжения на катушке и, следовательно потоку и индукции поля B через нее, подаются на два канала осциллографа. Далее, настроив коэффициенты усиления каналов осциллографа и напряжение на входе ЛАТРа можно получить на экране осциллографа изображение петли гистерезиса. Это изображение можно записать (например, на *flesh* накопитель) и перерисовать в координатах $B(H)$, получив в результате картину магнитного гистерезиса в образце. Связь напряженности поля H и тока в цепи I находится по теореме о циркуляции: $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I$, откуда $H = \frac{N_1 I}{\pi D}$, где N_1 – число витков в первой катушке, D – средний диаметр тороидального сердечника. Связан с напряжением V_{in1} по закону Ома: $V_{in1} = R_1 I$. Напряжение на катушке (первой или второй) по закону Фарадея пропорционально производной индукции поля B в сердечнике: $V = -\frac{d\Phi}{dt} = -S N_i \frac{dB}{dt}$. Здесь S – площадь поперечного сечения тороидального сердечника, N_i – число витков в катушке. Для того чтобы измерять сигнал пропорциональный индукции поля используется интегрирующая цепочка из сопротивления R емкости. Можно показать, что если постоянная времени цепочки RC значительно превышает период изменения сигнала (в данном случае это период колебания напряжения в сети электроснабжения равный 17 мс), то напряжение на конденсаторе V_{in2} равно

$\frac{1}{RC} \int V dt = \frac{1}{RC} S N_1 B$. Отсюда $B = V_2 RC \frac{1}{S N_2}$. Тогда напряжение V_{in2} пропорционально индукции поля в образце. Намагниченность \mathbf{M} связана с полем соотношением $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$. Магнитная восприимчивость в общем случае равна $\chi = \frac{dM}{dH}$. Индуктивность тороидальной катушки по известной формуле $L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \mu h}{2\pi} \cdot \ln \frac{R}{r}$, где h - ширина сердечника, R - наружный радиус, r - внутренний радиус тора.

4.2 Ход работы

В ходе работы были собраны обе схемы. Для второй схемы потребовалось намотать на исходную катушку вторую катушку из 56 витков. Провода для нее использовались тонкие, так как по данной катушке текли небольшие токи. Данные снимались с помощью цифрового осциллографа для дальнейшего анализа.

4.3 Анализ данных

4.3.1 Первая схема

Для первой схемы был получен только один график петли гистерезиса, так как уже на малых напряжениях картина получалась искаженной.

Петля гистерезиса для ферритового сердечника. Схема 1

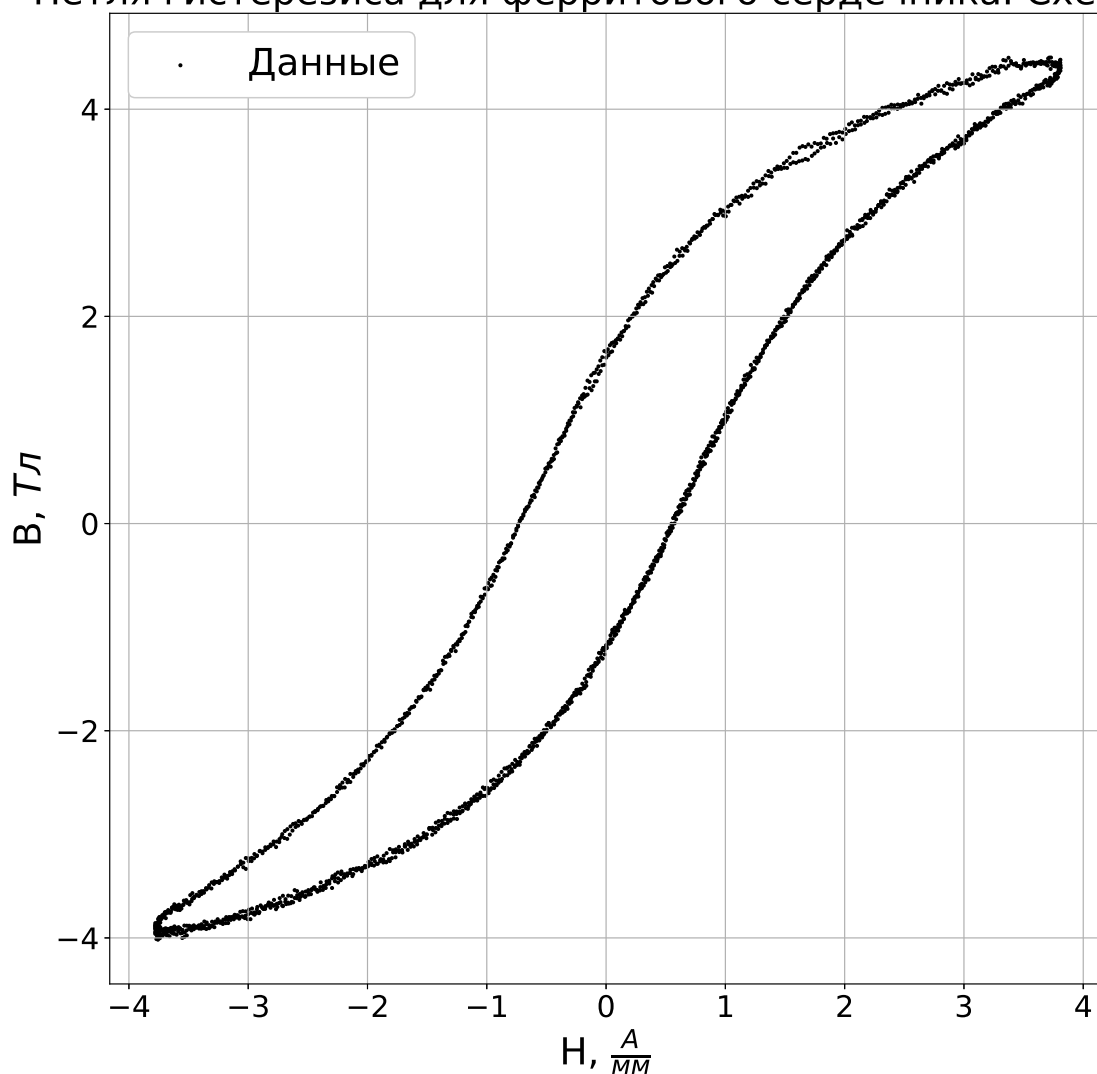


Рис. 5: Петля гистерезиса для ферритового сердечника. Схема 1

4.3.2 Вторая схема

Для второй схемы было получено больше неискаженных графиков для разных напряжений на ЛАТР. Поэтому все расчеты было решено проводить именно по данным, полученным со второй схемы.

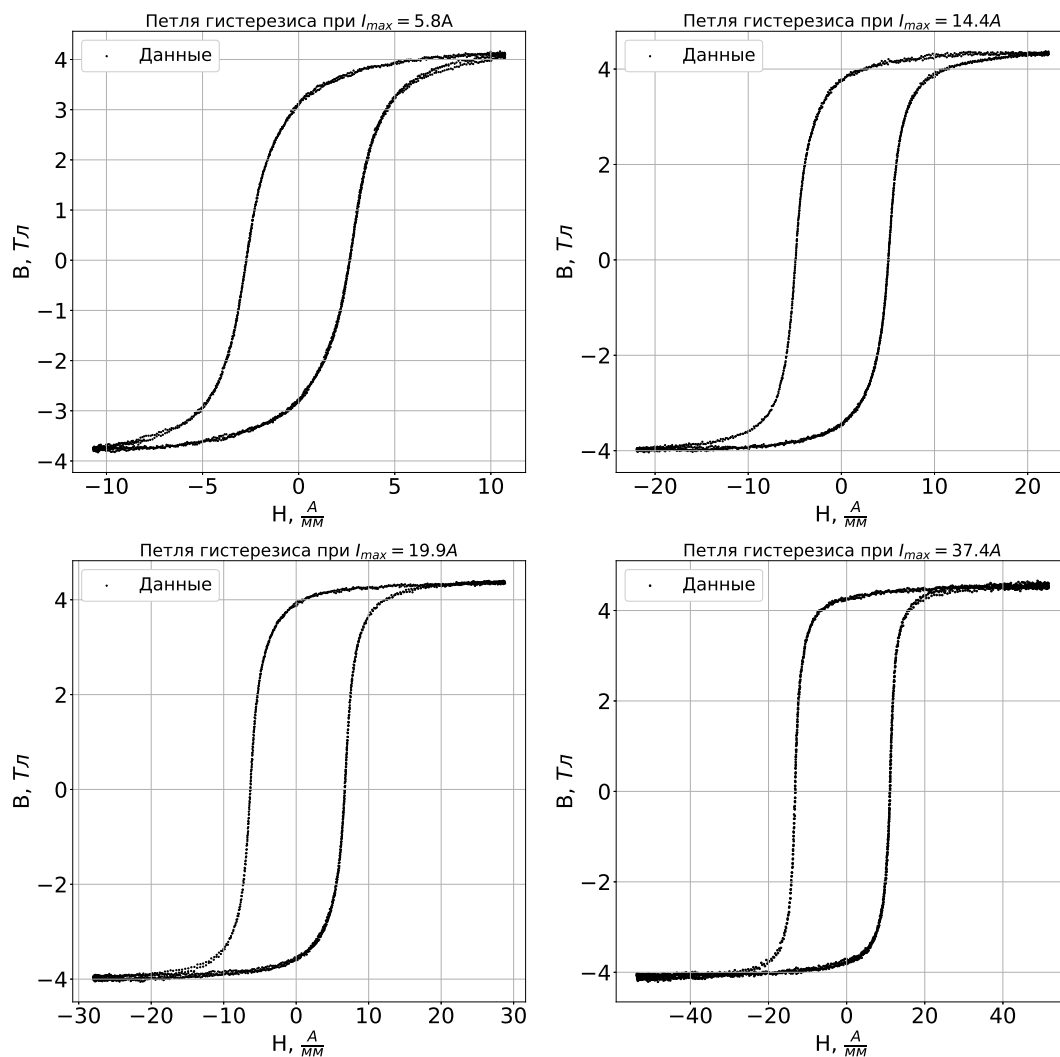


Рис. 6: Петли гистерезиса при разных максимальных токах в цепи. Схема 2

4.3.3 Намагниченность

Получив зависимость $B(H)$, перестроим ее в координатах $M(H)$, воспользовавшись соотношением из теории.

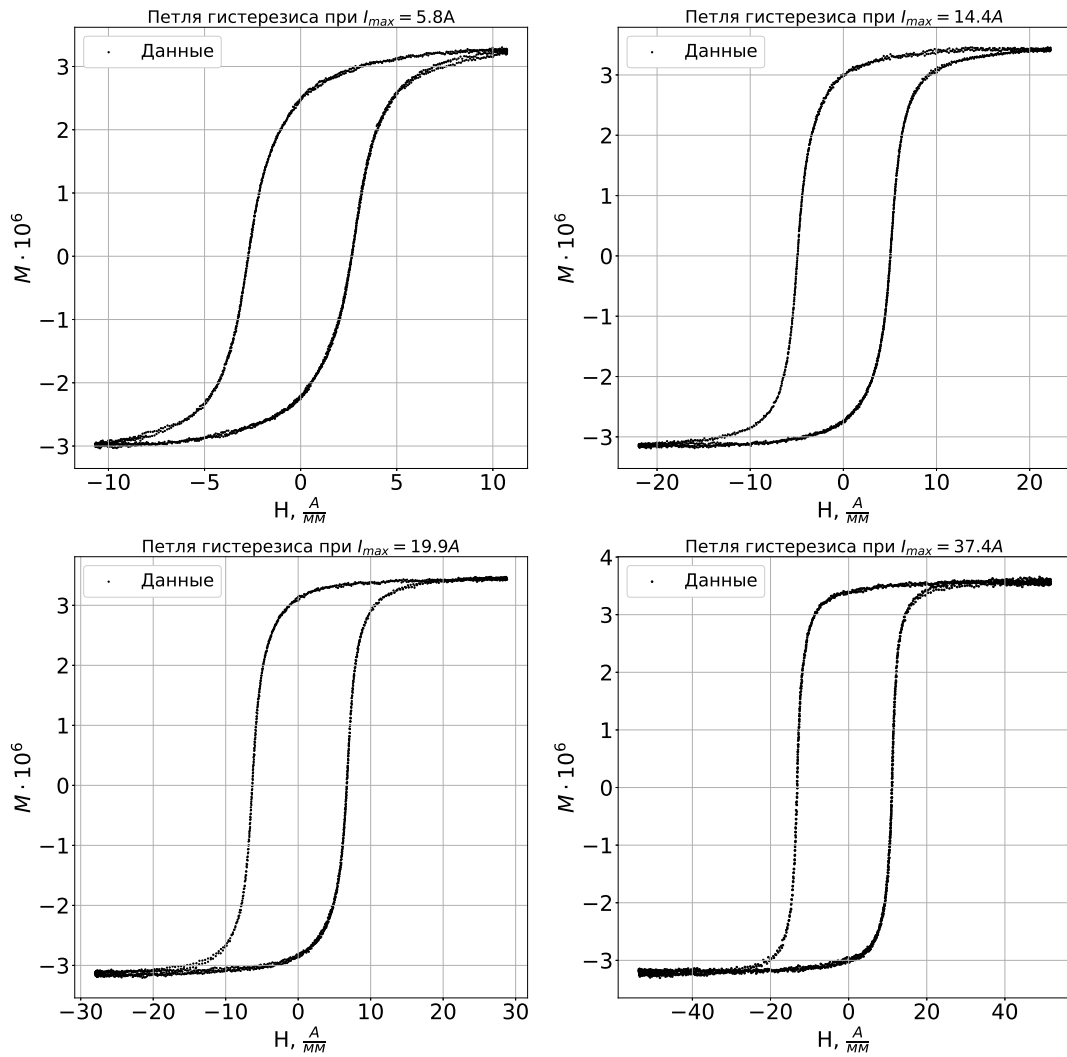


Рис. 7: Зависимость $M(H)$ при разных максимальных токах в цепи. Схема 2

Как и следовало ожидать, получился гистерезис.

4.3.4 Магнитная восприимчивость

В случае гистерезиса, про магнитную восприимчивость корректно говорить как про переменную величину, равную производной $\frac{dM}{dH}$. Построим график зависимости $\chi(H)$

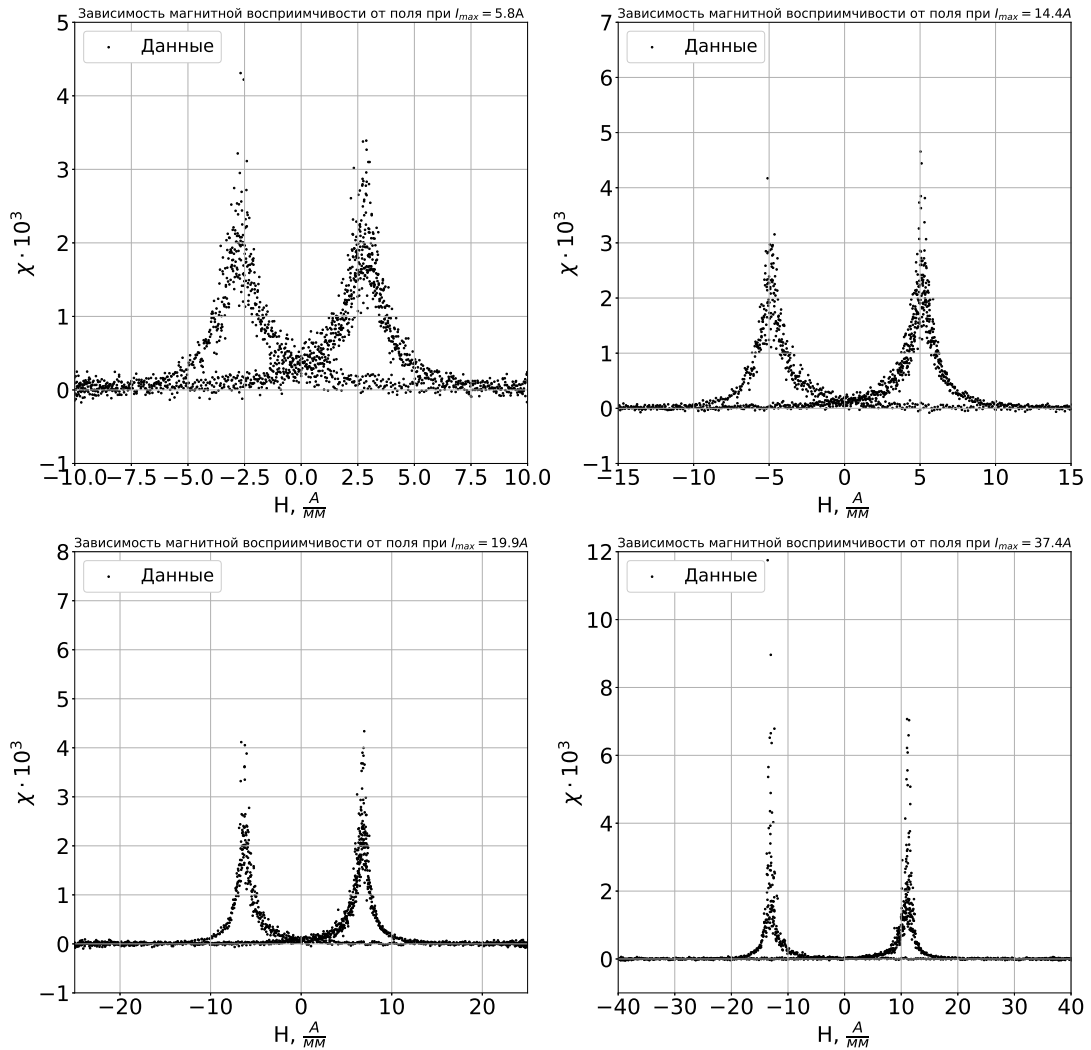


Рис. 8: Зависимость магнитной восприимчивости от поля. Схема 2

Рассматривая положительную часть графика, можно увидеть, что магнитная восприимчивость по увеличению поля увеличивается, затем достигает максимума и убывает к нулю.

4.3.5 Коэрцитивная сила и остаточная намагниченность

По данным, полученным при разных значениях тока найдем пересечения петли с осями B и H , значения $\pm H_c$ и $\pm B_r$ соответственно будут называться коэрцитивной силой и остаточной намагниченностью. Усреднив абсолютные значения B_r и H_c (они разные, так как петля неидеально симметрична) для

разных значений максимального тока в цепи получим разные значения B_r и H_c . Значит, про значение этих параметров не очень интересно говорить при фиксированном значении силы тока. Построим по нашим четырем петлям зависимости $H_c(I_{max})$ и $B_r(I_{max})$.

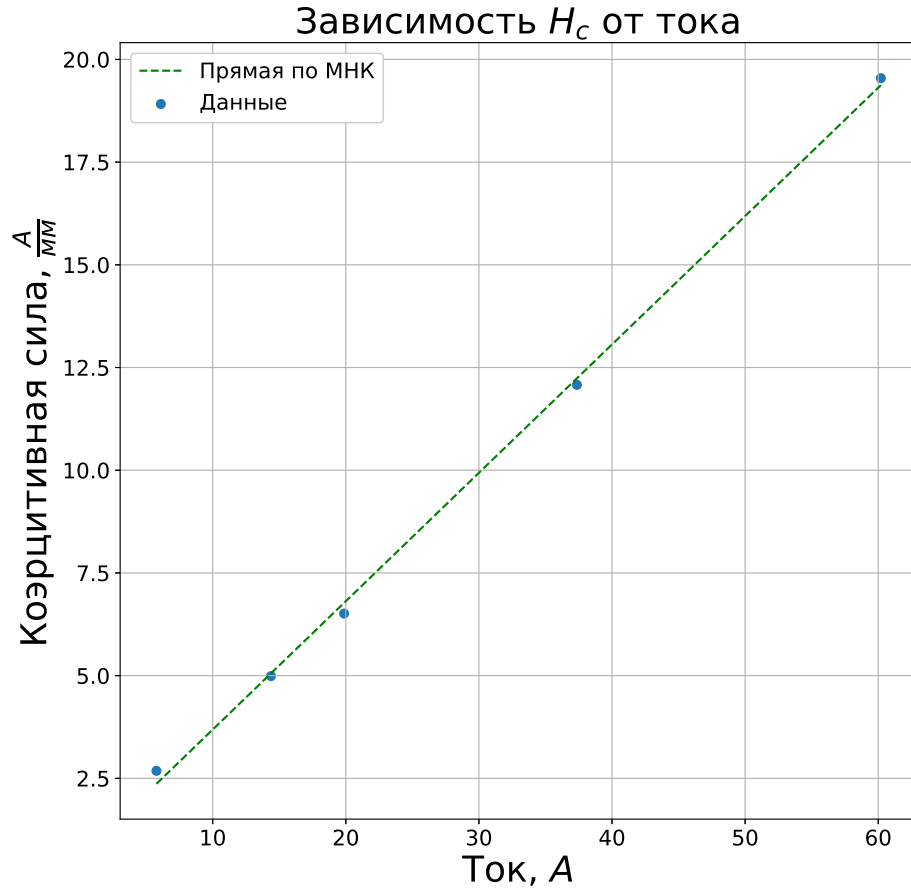


Рис. 9: Зависимость коэрцитивной силы от максимальной силы тока в цепи.
Схема 2

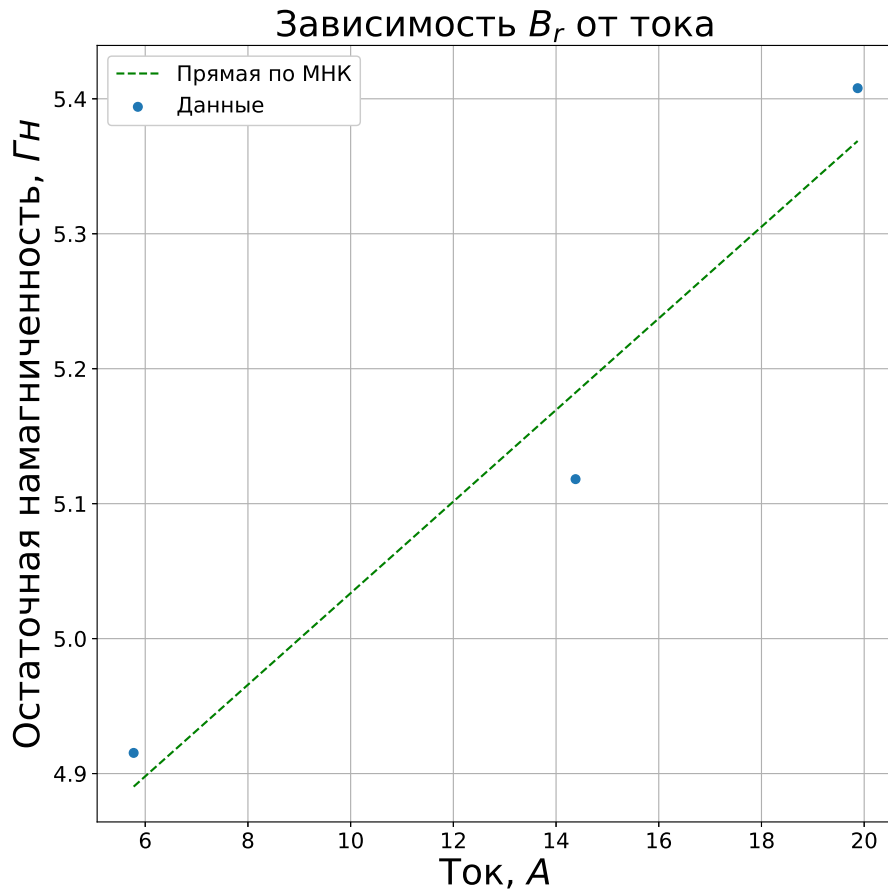


Рис. 10: Зависимость остаточной намагниченности от силы тока. Схема 2

По получившемуся результату можно предположить, что коэрцитивная сила ведет себя линейно по отношению к току (на графике изображена одна дополнительная точка для эксперимента с самым большим током. Если рассматривать только те графики, на которых $H = 0$ вне района насыщения (таких точек только 3), то линейно по отношению к максимальному току ведет себя и остаточная намагниченность.

$$\text{При } I = 5.77\text{А} : \begin{aligned} H_c &\approx 2.68 \frac{\text{А}}{\text{мм}} \\ B_r &\approx 4.05 \text{ Тл} \end{aligned}$$

$$\text{При } I = 14.38\text{А} : \begin{aligned} H_c &\approx 4.99 \frac{\text{А}}{\text{мм}} \\ B_r &\approx 4.91 \text{ Тл} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{При } I = 19.87\text{А} : H_c &\approx 6.51 \frac{\text{А}}{\text{мм}} \\ B_r &\approx 5.11 \text{ Тл} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{При } I = 37.36\text{А} : H_c &\approx 12.07 \frac{\text{А}}{\text{мм}} \\ B_r &\approx 5.41 \text{ Тл} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{При } I = 60.20\text{А} : H_c &\approx 19.54 \frac{\text{А}}{\text{мм}} \\ B_r &\approx 3.32 \text{ Тл} \end{aligned}$$