

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЭС-0

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: определить удельное сопротивление резистивного провода; изучить зависимость силы тока в цепи от напряжения; выяснить основные закономерности работы источника электрической энергии.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Характеристикой упорядоченного движения зарядов является **сила тока** – скалярная величина, численно равная количеству заряда, переносимого носителями тока через сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

Электрический ток может быть распределен по поверхности, через которую он течет, неравномерно (рис.1). Поэтому более детально электрический ток характеризуют с помощью вектора **плотности тока** \vec{j} . Он численно равен отношению силы тока dI , протекающего через расположенную в данной точке площадку, перпендикулярную к направлению движения носителей зарядов, к величине этой площадки:

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n} = \frac{dq}{dt \cdot dS} \vec{n} \quad (2)$$

где \vec{n} – единичный вектор, перпендикулярный к dS .

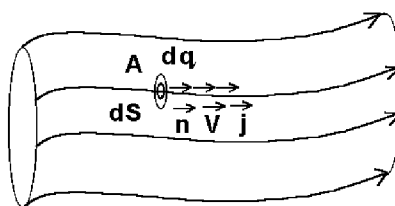


Рис.1

За положительное направление тока принимается направление движения положительных носителей тока. Зная вектор плотности тока в каждой точке проводника, можно найти силу тока I через любую поверхность S :

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \int_S j_n \cdot dS \quad (3)$$

где $d\vec{S} = \vec{n}_i \cdot dS$ – вектор элементарной площадки поверхности S , составляющий в общем случае с вектором \vec{j} угол α , $j_n = j \cos \alpha$ – проекция вектора \vec{j} на направление нормали n (рис.2).

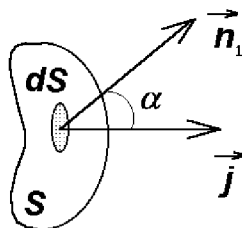


Рис.2

Сила тока, протекающего через поперечное сечение проводника (рис.3), если $j_n = j$, будет равна:

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S} = \int_S j \cdot dS \quad (4)$$

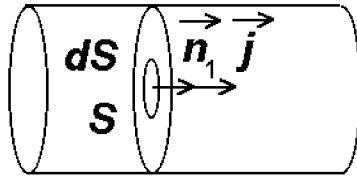


Рис.3

Для однородного проводника плотность тока одинакова по всему поперечному сечению S проводника, поэтому:

$$I = \vec{j} \cdot S \cdot \vec{n} = j \cdot S \quad (5)$$

Электрический ток в металле возникает под действием внешнего электрического поля, которое вызывает упорядоченное движение электронов. Плотность тока \vec{j} равна:

$$\vec{j} = n_0 \cdot |e| \cdot \langle \vec{v} \rangle \quad (6)$$

где $n_0 = (10^{28} - 10^{29}) \text{ м}^3$ – концентрация электронов проводимости в металле: $|e| = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; $\langle \vec{v} \rangle$ – средняя скорость упорядоченного движения электронов (для самых больших плотностей токов составляет 10^{-4} м/с, что значительно меньше средней квадратичной тепловой скорости электронов $v = 10^5$ м/с при $T = 273$ К).

Для плотности тока справедлив закон Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \quad (7)$$

где γ – удельная электропроводность; $\rho = \frac{1}{\gamma}$ – удельное электрическое сопротивление среды.

Используя (5) и (7), находим уравнение для определения **удельного сопротивления** однородного проводника:

$$\rho = \frac{E}{j} = \frac{ES}{I} \quad (8)$$

В металлическом проводнике имеется электрическое поле, которое создается электронами и положительными ионами кристаллической решетки поле кулоновских сил. Кулоновское взаимодействие между зарядами в металле приводит к такому равновесному распределению зарядов, при котором электрическое поле внутри проводника равно нулю и весь проводник является эквипотенциальным.

Для создания упорядоченного равновесного (стационарного) движения электронов в металле необходимы незлектрические сторонние силы, которые непрерывно разъединяют разноименные заряды и поддерживают постоянную разность потенциалов на концах проводника.

Стационарное электрическое поле сторонних сил создается источниками электрической энергии. В любой точке внутри участка проводника, соединяющего источник электрической энергии, существуют электростатическое поле кулоновских сил $\vec{E}_{кул}$ и электрическое поле сторонних сил $\vec{E}_{стор}$. По принципу суперпозиции полей напряженность результирующего поля равна:

$$\vec{E} = \vec{E}_{кул} + \vec{E}_{стор} \quad (9)$$

Закон Ома для плотности тока в этом случае дает:

$$\vec{j} = \frac{I}{\rho} (\vec{E}_{\text{кул}} + \vec{E}_{\text{стор}}) \quad (10)$$

Это позволяет получить соотношение для участка 1-2 (рис. 4) однородного проводника с сечением S :

$$\int_1^2 \rho \frac{dl}{S} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{кул}} \cdot d\vec{l} + \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{1,2} \quad (11)$$

где $d\vec{l}$ – вектор с модулем dl , равным элементу длины проводника, направленным по касательной к проводнику в сторону вектора плотности тока.

Интеграл $\int_1^2 \vec{E}_{\text{кул}} \cdot d\vec{l}$ численно равен работе $A_{1,2\text{кул}}$, совершаемой кулоновскими силами при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2:

$$\int_1^2 \vec{E}_{\text{кул}} d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2$$

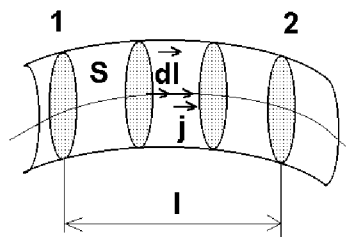


Рис.4

Электродвижущая сила (ЭДС) $\varepsilon_{1,2}$, действующей на участке цепи 1-2, называется линейный интеграл

$$\varepsilon_{1,2} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l} \quad (12)$$

численно равна работе $A_{1,2\text{стор}}$, совершаемой сторонними силами при перемещении по проводнику единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2. Работа производится за счет энергии источника тока.

Напряжением $U_{1,2}$ на участке цепи 1-2 называется физическая величина, численно равная работе $A_{1,2}$, совершаемой результирующим полем кулоновских и сторонних сил при перемещении вдоль цепи из точки 1 в точку 2 единичного положительного заряда:

$$U_{1,2} = \int_1^2 (\vec{E}_{\text{кул}} + \vec{E}_{\text{стор}}) \cdot d\vec{l} = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{1,2} \quad (13)$$

Напряжение на концах участка цепи совпадает с разностью потенциалов только в том случае, если на участке не приложены ЭДС.

Сопротивление $R_{1,2}$ участка между сечениями 1 и 2 может быть найдено путем интегрирования:

$$R_{1,2} = \int_1^2 \rho \frac{dl}{S} \quad (14)$$

Для однородного линейного проводника $\rho = \text{const}$, $S = \text{const}$, поэтому

$$R_{1,2} = \rho \frac{l_{1,2}}{S} \quad (15)$$

откуда

$$\rho = R_{l,2} \frac{S}{l_{l,2}} \quad (16)$$

где $l_{l,2}$ – длина проводника между сечениями 1 и 2.

Умножив левую и правую части уравнения (14) на I и используя (11), получим обобщенный закон Ома для произвольного участка цепи

$$IR_{1,2} = U_{1,2} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{1,2} \quad (17)$$

Закон Ома для замкнутой электрической цепи имеет вид

$$I \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i,$$

так как работа кулоновских сил по замкнутому контуру равна нулю:

$$\int \vec{E}_{кул} d\vec{l} = \sum_{i=1}^n (\varphi_1 - \varphi_2) = 0;$$

где $\sum_{i=1}^k \varepsilon_i$ – алгебраическая сумма всех ЭДС, приложенных в цепи.

Если замкнутая цепь состоит из источника электрической энергии с ЭДС, равной ε , и внутренним сопротивлением r , а сопротивление внешней части цепи равно R (рис.5), то закон Ома имеет вид

$$I(R + r) = \varepsilon \quad I = \frac{\varepsilon}{(R + r)} \quad (18)$$

(r, ε - постоянные величины), то ясно, что величина I полностью зависит от R .

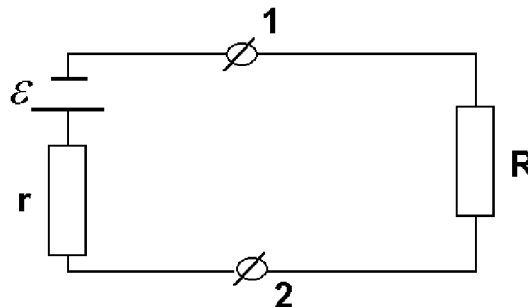


Рис.5

Разность потенциалов на клеммах источника равна напряжению на внешней части цепи:

$$\varphi'_1 - \varphi'_2 = R \cdot I = \varepsilon - I \cdot r \quad (19)$$

Если цепь разомкнута ($I = 0$), то

$$\varphi'_1 - \varphi'_2 = \varepsilon \quad (20)$$

Если внешняя часть состоит из сопротивления нагрузки $R_n = R$, к которой подключен источник ЭДС с внутренним сопротивлением r , то напряжение на нагрузке (совпадающее с напряжением на зажимах ЭДС) получим, умножив левую и правую части уравнения (18) на R_n :

$$U_n = IR_n = \varepsilon \frac{R_n}{R_n + r} \quad (21)$$

При $R_n = \infty$ (т.е. когда цепь разомкнута) $U_n = \varepsilon$.

Применим уравнение (11), используя (12) и учитывая, что для замкнутого контура работа кулоновских сил равна нулю,

$$\int E_{кул} dl = 0 \quad (22)$$

Для определения работы по переносу заряда dq вдоль замкнутой цепи

$$dA = dq \int \vec{E}_{\text{кул}} d\vec{l} + dq \int \vec{E}_{\text{стоп}} d\vec{l} = \varepsilon \cdot dq \quad (23)$$

Мощность, развиваемая источником ЭДС:

$$P = \frac{dA}{dt} = \varepsilon \frac{dq}{dt} = \varepsilon \cdot I \quad (24)$$

Подставив значение силы тока из (18), получим ($R = R_n$)

$$P = \frac{\varepsilon^2}{(R_n + r)} \quad (25)$$

В нагрузке выделяется только часть этой мощности (**полезная мощность**):

$$P_n = R_n \cdot I^2 = I \cdot U_n = \frac{\varepsilon^2 \cdot R_n}{(R_n + r)^2} = \frac{\varepsilon}{(R_n + r)^2} \cdot \frac{R_n}{(R_n + r)} \quad (26)$$

Отношение полезной мощности ко всей мощности, развиваемой ЭДС в цепи, определяет КПД источника тока:

$$\eta = \frac{P_n}{P} = \frac{R_n}{(R_n + r)} = \frac{U_n}{\varepsilon} \quad (27)$$

Найдем соотношение между R_n и r , при котором полезная мощность, отбираемая от источника тока, будет наибольшей. Для этого найдем экстремум функции (26):

$$\frac{dP_n}{dR_n} = \varepsilon^2 \frac{r - R_n}{(r + R_n)^3} = 0 \quad (28)$$

Видно, что P_n имеет максимум при $R_n = r$ (другое решение $R_n = \infty$ соответствует минимуму P_n).

Следовательно, чтобы отобрать от данной ЭДС наибольшую полезную мощность, нужно взять сопротивление нагрузки, равное сопротивлению источника тока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Задание 1. Определение удельного сопротивления резистивного провода.

- 1.1. Получить у преподавателя вариант задания и данные занести в таблицу 1.
- 1.2. Переключатели 1 и 2 установить во включенное положение, при этом установка будет работать согласно схеме, изображенной на рис.6.

Таблица 1

| | $l_{1,2} = \text{м}$ $U_{1,2} = \text{В}$ | $l_{1,2} = \text{м}$ $U_{1,2} = \text{В}$ | $l_{1,2} = \text{м}$ $U_{1,2} = \text{В}$ | $l_{1,2} = \text{м}$ $U_{1,2} = \text{В}$ |
|--|--|--|--|--|
| $I_1, \text{А}$ | | | | |
| $I_2, \text{А}$ | | | | |
| $I_3, \text{А}$ | | | | |
| $I_{\text{ср}}, \text{А}$ | | | | |
| $\rho_{\text{ср}}, \text{Ом} \cdot \text{м}$ | | | | |

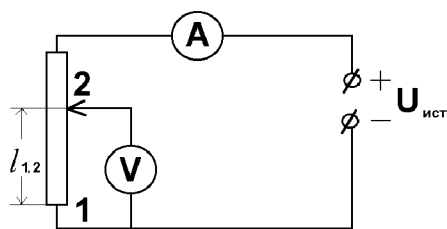


Рис.6

- 1.3. Ручку "Рег. тока" установить в крайнее левое положение.
- 1.4. Включить прибор, нажав кнопку "Сеть".
- 1.5. Установить первую длину проводника $l_{1,2}$ на вертикальной линейке с помощью скользящего контакта .
- 1.6. Вращая ручку "Рег. тока", установить напряжение $U_{1,2}$ (согласно задания).
- 1.7. Для пары значений $l_{1,2}$ и $U_{1,2}$ 3 раза измерить значение тока I и рассчитать среднее значение силы тока. Результаты измерений занести в таблицу 1.
- 1.8. Установить следующее значение длины проводника и повторить измерения пунктов 1.6 и 1.7.
- 1.9. Измерить диаметр резистивного провода.
- 1.10. После снятия всех результатов измерений прибор выключить.
- 1.11. По результатам измерений определить среднее значение удельного сопротивления ρ проводника, учитывая, что рабочая формула для определения удельного сопротивления однородного резистивного провода согласно (16), (17) и (19) примет вид:

$$\rho = R_{1,2} \frac{S}{l_{1,2}} = \frac{U_{1,2} \cdot S}{I \cdot l_{1,2}} = \frac{U_{1,2} \cdot \pi \cdot d^2}{I \cdot 4 \cdot l_{1,2}} \quad (29)$$

где $R_{1,2}$ – сопротивление резистивного провода на участке 1-2; S – площадь его поперечного сечения; I – ток, проходящий в проводнике; $l_{1,2}$ – длина проводника на участке 1-2; d – диаметр резистивного провода.

- 1.12. По рассчитанному $\rho_{ср}$ определить материал проводника.

Задание 2. Исследование работы источника электрической энергии

2.1. Переключатель 1 установить в отключенное положение, а переключатель 2 во включенное и вольтметр покажет ЭДС источника. Записать это значение в тетрадь рядом с таблицей 2.

2.2. Переключатель 2 установить в отключенное состояние, при этом к источнику тока подключится сопротивление нагрузки R_n , схема примет вид рис.7.

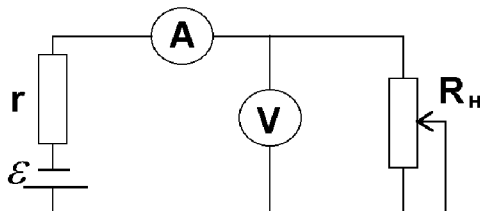


Рис.7

2.3. Изменяя сопротивление R_n (вращая ручку "Рег.тока"), снять зависимость $U_n = f(I)$ не менее, чем для десяти значений тока с интервалом 25-30 мА (при этом измерения должны быть проведены во всем допустимом по силе тока диапазоне значений).

2.4. После снятия всех результатов измерений прибор выключить. 2.5. Построить график зависимости $U_H = f(R_H)$ и сравнить его с аналитической зависимостью (21). При заполнении таблицы 2 следует учесть, что рассчитывать величины надо только на основе данных, полученных экспериментально, а не в результате других расчетов. Заполнить таблицу 2 согласно формулам:

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} \qquad r = \frac{\varepsilon}{I_H} - R_H$$

$$P_H = I_H U_H \qquad P = I_H \varepsilon \qquad \eta = \frac{U_H}{\varepsilon}$$

Таблица 2

| | | | | | | | | | | |
|------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| I_H , А | | | | | | | | | | |
| U_H , В | | | | | | | | | | |
| R_H , Ом | | | | | | | | | | |
| r , Ом | | | | | | | | | | |
| R_H/r | | | | | | | | | | |
| P , Вт | | | | | | | | | | |
| P_H , Вт | | | | | | | | | | |
| η | | | | | | | | | | |

- 2.6. Построить график зависимости $P = f(R_H/r)$.
 2.7. Построить график зависимости $P_H = f(R_H/r)$.
 2.8. Построить график зависимости $\eta = f(R_H/r)$.

В заключении к работе необходимо пояснить результаты, полученные в задании 1 и объяснить полученные в задании 2 зависимости.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется электрическим током?
2. Что называется плотностью тока?
3. Записать закон Ома в дифференциальной форме.
4. Что называется ЭДС?
5. Что называется падением напряжения на участке цепи?
6. Что называется сопротивлением участка цепи?
7. Записать обобщенный закон Ома для участка цепи.
8. Вывести формулу для определения удельного сопротивления.
9. Вывести формулу для мощности, развиваемой источником ЭДС.
10. Вывести формулу для полезной мощности и КПД источника.
11. При каком соотношении сопротивления источника тока и сопротивления нагрузки будет максимальная полезная мощность?
12. Как можно уменьшить ошибку измерений, используя одни и те же измерительные приборы и инструменты?

ОТЧЕТ

по лабораторной работе по физике

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ФИО студента _____

Группа _____

Работа выполнена _____

Цель работы: _____

Краткая теория

1. Физические величины, характеризующие электрический ток
2. Понятия напряжения ЭДС и разности потенциалов
3. Сопротивление и удельное сопротивление
4. Понятие мощности и КПД электрической цепи
5. Законы Ома для электрических цепей

Экспериментальная часть

Задание 1. Определение удельного сопротивления резистивного провода.

Расчетные формулы

Среднее значение удельного сопротивления ρ проводника

Диаметр резистивного провода $d =$

Таблица 1

| | $I_{1,2} =$ $U_{1,2} =$ | $I_{1,2} =$ $U_{1,2} =$ | $I_{1,2} =$ $U_{1,2} =$ | $I_{1,2} =$ $U_{1,2} =$ |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| i_1, A | | | | |
| i_2, A | | | | |
| i_3, A | | | | |
| i_{cp}, A | | | | |
| $\rho_{cp}, \text{Ом} \cdot \text{м}$ | | | | |

Вывод: _____

Материал проводника _____

Задание 2. Исследование работы источника электрической энергии

Расчетные формулы

Расчет сопротивления нагрузки (R_H) _____)

Расчет внутреннего сопротивления источника тока и его среднего значения (r и r_{cp}) _____

Расчет мощности, развиваемой источником ЭДС (P) _____

Расчет мощности, выделяющейся на нагрузке (P_H) _____

КПД источника тока (η) _____

Таблица 2

| | | | | | | | | | | |
|------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| i_H, A | | | | | | | | | | |
| U_H, B | | | | | | | | | | |
| $R_H, \text{Ом}$ | | | | | | | | | | |
| $r, \text{Ом}$ | | | | | | | | | | |
| R_H/r | | | | | | | | | | |
| $P, \text{Вт}$ | | | | | | | | | | |
| $P_H, \text{Вт}$ | | | | | | | | | | |
| η | | | | | | | | | | |

ЭДС источника - _____

График зависимости $U_H = f(R_H)$

График зависимости $P = f(R_H/r)$

График зависимости $P_H = f(R_H/r)$

График зависимости $\eta = f(R_H/r)$

Вывод

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЭС-1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: построение эквипотенциальных и силовых линий электростатического поля. Расчет напряженности электростатического поля.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Любое заряженное тело создаёт в окружающем пространстве электрическое поле. Если тела неподвижны и их заряды постоянны, то создаваемое поле не изменяется по времени и называется электростатическим.

Характерным свойством произвольного электрического поля, отличающим его от других физических полей, является его действие как на движущиеся, так и на неподвижные электрические заряды. Количественной силовой характеристикой действия электрического поля на заряженные частицы и тела является вектор \vec{E} напряженности электрического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1)$$

где \vec{F} - сила, действующая со стороны поля на неподвижный пробный заряд q , помещённый в рассматриваемую точку поля.

Таким образом, **напряжённость электрического поля** в данной точке пространства есть величина, численно равная силе, действующей со стороны поля на помещённый в эту точку единичный пробный точечный заряд. Поле, напряжённость которого в каждой точке пространства одинакова, называется однородным.

Электрический заряд считается точечным, если можно пренебречь размерами и формой тела, на котором этот заряд сосредоточен.

Электрический заряд называется пробным, если он достаточно мал, что не искажает электростатического поля, в которое он помещён.

Напряжённость — величина векторная, направление вектора напряжённости совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд. Взаимодействие неподвижных точечных зарядов описывает **закон Кулона**: сила электростатического взаимодействия между двумя точечными электрическими зарядами q_1 и q_2 , находящимися в вакууме, прямо пропорциональна произведению величин зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними r , и направлена вдоль прямой, соединяющей заряды:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2)$$

В векторной форме закон Кулона записывается следующим образом:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}_{12},$$

где \vec{r}_{12} - радиус-вектор, соединяющей заряд q_1 с зарядом q_2 ; r - расстояние между зарядами.

Из закона Кулона (2) следует, что напряжённость электростатического поля, созданного точечным зарядом, определяется выражением:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^3} \vec{r}, \quad (3)$$

где \vec{r} - радиус-вектор, проведённый из точки, в которой находится заряд Q , в точку, в которой отыскивается напряжённость поля. Напряжённость поля в системе СИ выражается в единицах вольт на метр (В/м).

В случае, когда источников электрического поля в пространстве имеется несколько, расчет напряженности электрического поля в заданной точке проводят по **принципу суперпозиции**:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

Важной особенностью электростатического поля является то, что работа, которая совершается при перемещении электрического заряда в электростатическом поле с напряжённостью E , не зависит от формы пути, по которому происходит перемещение, а зависит только от начального и конечного положения заряда. Такое свойство поля называется **потенциальностью**. Потенциальный характер электростатического поля позволяет ввести понятие разности потенциалов.

Разностью потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$) между точками 1 и 2 электростатического поля называется работа, совершаемая силами поля при перемещении единичного положительного заряда по произвольной траектории из точки 1 в точку 2, т.е.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}, \quad (4)$$

где A_{12} - работа по перемещению заряда q из точки 1 в точку 2. Отсюда

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (5)$$

С другой стороны, работа, совершаемая при перемещении тела в потенциальном поле, всегда равна со знаком минус изменению потенциальной энергии тела

$$A_{12} = -(W_2 - W_1) = W_1 - W_2 \quad (6)$$

Сравнивая формулы (5) и (6), получаем $W = q\varphi$, или

$$\varphi = \frac{W}{q}, \quad (7)$$

т.е. потенциал данной точки поля есть величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещённого в эту точку.

Потенциал зависит от выбора точки с нулевым потенциалом, которая может быть выбрана произвольно. Обычно в физике считают, что нулю равен потенциал бесконечно удалённой точки (в технике равным нулю принимают потенциал Земли). Тогда:

$$\varphi_1 = \frac{A_1^\infty}{q} \quad (8)$$

т. е. потенциал точки 1 равен работе, совершаемой силами поля при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в бесконечность.

Потенциал поля, созданного точечным зарядом в данной точке, рассчитывается как:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

где: r – расстояние, от источника поля до искомой точки.

Для графического изображения электростатических полей используют силовые линии и эквипотенциальные поверхности.

Силовыми линиями называют линии, касательные к которым в каждой точке пространства совпадают с направлением вектора напряжённости \vec{E} в этой точке поля.

Эквипотенциальной поверхностью называют поверхность, в каждой точке которой потенциал имеет одно и то же значение.

По известному расположению силовых линий электростатического поля можно построить эквипотенциальные поверхности и, наоборот, зная, как расположены эквипотенциальные поверхности, можно в каждой точке поля найти величину и направление напряжённости поля, т.е. построить силовые линии.

Между напряжённостью \vec{E} и потенциалом электростатического поля φ существует связь:

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi, \quad (9)$$

или в более подробной записи

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right),$$

т.е. вектор напряжённости поля E равен со знаком минус градиенту потенциала поля в этой точке пространства.

Градиент потенциала $\text{grad}\varphi$ есть вектор, направленный в сторону максимального возрастания потенциала, и длина которого равна производной потенциала φ в этом же направлении. Отсюда с учётом формулы (9) следует, что силовые линии электростатического поля есть линии, вдоль которых потенциал φ уменьшается наиболее быстро. Они перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям (см.рис. 1).

В местах, где соседние эквипотенциальные поверхности более близко подходят друг к другу, напряжённость поля больше. Силовые линии проводят так, чтобы их густота характеризовала численное значение напряжённости E .

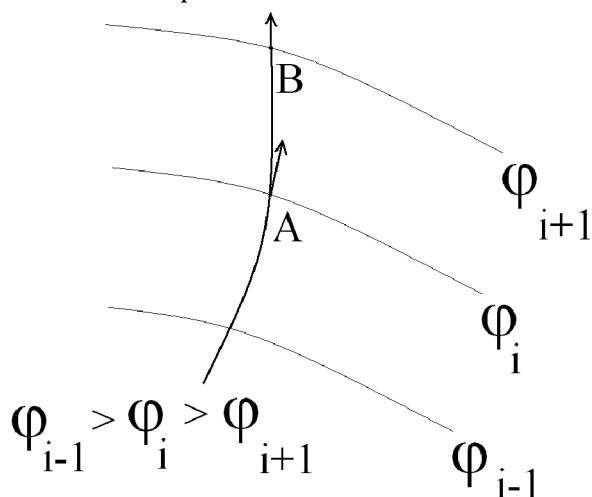


Рис. 1

Совокупность силовых линий и эквипотенциальных линий иногда называют картой поля. По эквипотенциальным линиям можно найти величину и направление вектора напряжённости электрического поля \vec{E} в любой его области.

Пусть требуется найти напряжённость поля в точке A (см.рис.1), лежащей на эквипотенциальной линии с потенциалом φ_i (индекс i может принимать значения $1, 2, 3, \dots$). Тогда через точку A нужно провести силовую линию. В окрестности точки A она перпендикулярна эквипотенциальной линии. Вектор \vec{E} направлен по касательной к этой силовой линии.

Численное значение напряжённости поля находится по следующей приближённой формуле

$$E \approx \frac{\Delta\varphi}{\Delta\ell} \quad (10)$$

где $\Delta\varphi$ - разность потенциалов между точкой A и точкой B , лежащей на пересечении силовой линии и соседней эквипотенциальной линией с потенциалом $\varphi_{i+1} > \varphi_i$; $\Delta\ell$ - расстояние между точками A и B .

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментального исследования электростатических полей широко используется метод электролитической ванны.

Пусть требуется изучить поле, создаваемое двумя заряженными электродами A и B . Для этого электроды помещают в ванну, заполненную тонким слоем слабого электролита (обычно вода). После подключения электродов к источнику напряжения в электролите, возникает поле. (рис. 2).

В электролит вводится зонд S , представляющий собой тонкий металлический стержень. Зонд подключается к подвижной точке K делителя напряжения (потенциометра). Между зондом S и точкой K включается индикатор (вольтметр или осциллограф). Перемещая зонд по поверхности электролита, определяют такие его положения, при которых размах сигнала на экране осциллографа минимален, и отмечают их на листе бумаги. Во всех этих положениях потенциал зонда равен потенциалу точки K потенциометра.

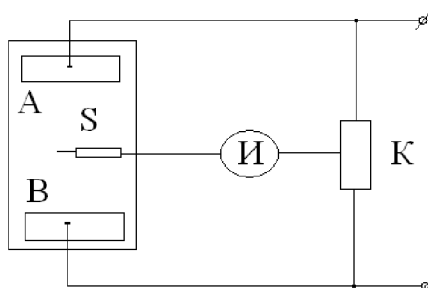


Рис.2

Все эти точки обладают одинаковым потенциалом. Соединив их плавной кривой, получают эквипотенциальную линию изучаемого поля. Изменив положение точки K делителя напряжения, можно построить эквипотенциальную линию, соответствующую новому значению потенциала.

Если на электроды подавать постоянное напряжение, то по электролиту будут течь постоянные токи, сопровождающиеся электролизом и выделением на электродах составных частей электролита. Эти токи будут нарушать однородность электролита, приводя к поляризации электродов и к изменению напряжения между ними. Во избежание этого на электроды подаётся переменное напряжение.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему согласно рис.3.
2. На лист бумаги поместить два электрода, указанных преподавателем, и карандашом обвести их контуры.
3. Убрать электроды, лист бумаги уложить в ванну рисунком вверх, с помощью куска поролона пропитать его водой. Уложить электроды на лист бумаги на свои места.
4. На пульте тумблер поставить в положение "10 В". С разрешения преподавателя включить тумблер сеть.
5. По прибору пульта ручкой "Установка напряжения" установить 2 В.
6. С помощью щупа найти в пространстве между электродами 5 эквипотенциальных точек по минимуму размаха изображения на экране осциллографа. Зафиксировать их на листе бумаги, слегка прокалывая бумагу остриём зонда, либо отмечая точки ручкой.
7. Последовательно устанавливая напряжение 3,4,5,6 В (либо другие значения по указанию преподавателя), повторить операции п.8.

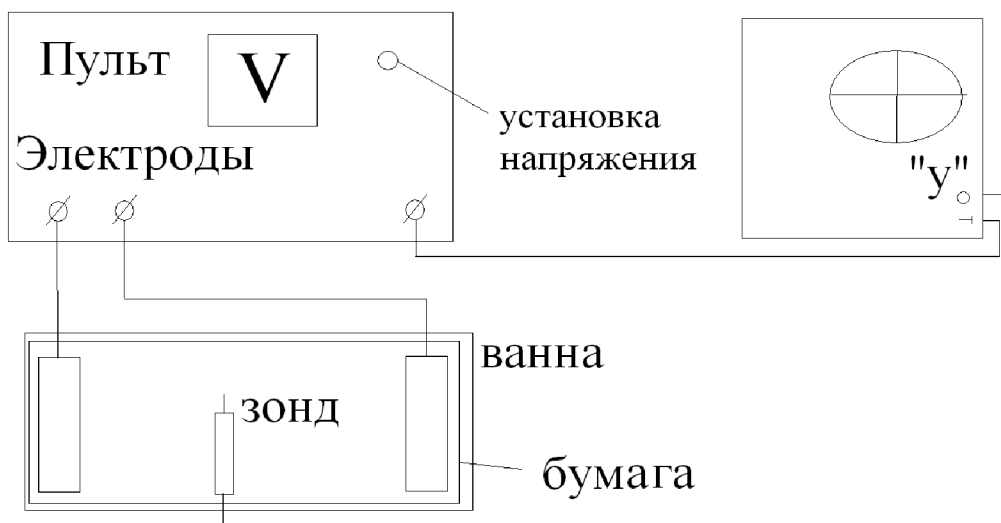


Рис.3

8. Выключить пульт.
9. Взять новый лист бумаги и построить все операции пп. 2-7 для новой пары электродов.
10. По окончании работы выключить питание пульта и разобрать схему.
11. Соединить точки, имеющие одинаковые потенциалы, плавной линией, указать напряжение, которое соответствует каждой полученной эквипотенциальной линии.
12. Перенести полученные карты поля в рабочую тетрадь.
13. Для каждой карты поля по формуле (10) рассчитать значение напряженности, выбирая точки на соседних эквипотенциальных линиях, вдоль одной линии напряженности (рис. 1). Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

Таблица

| Конфигурация электродов | Δl , м | $\Delta \phi$, В | E , В/м |
|-------------------------|----------------|-------------------|-----------|
| 1 | - | - | - |
| | - | - | - |
| | - | - | - |
| | - | - | - |
| 2 | | | |
| ... | | | |

В заключении к работе сделать вывод об однородности полей в каждом исследуемом случае.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое напряжённость электрического поля?
2. Сформулируйте закон Кулона; запишите его в векторной форме.
3. Дайте определение разности потенциалов, потенциала.
4. Что такое силовые линии и эквипотенциальные поверхности?
5. Докажите, что эквипотенциальные поверхности и силовые линии перпендикулярны друг другу.
6. Какова связь между напряжённостью и потенциалом электростатического поля?
7. Что такое карта поля? В чём суть метода электролитической ванны?

ОТЧЕТ

по лабораторной работе по физике

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

ФИО студента _____

Группа _____

Работа выполнена _____

Цель работы: _____

Краткая теория

1. Физические величины, характеризующие электрическое поле (напряженность, потенциал). Связь между напряженностью и потенциалом.
2. Принцип суперпозиции электростатических полей.
3. Работа поля по перемещению заряда.
4. Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле.
5. Графическое изображение электростатических полей.

Экспериментальная часть

Расчетные формулы

Напряженность электростатического поля

Таблица 1

| Конфигурация электродов | Δl , м | $\Delta\phi$, В | E, В/м |
|-------------------------|----------------|------------------|--------|
| 1 | - | - | - |
| | - | - | - |
| | - | - | - |
| | - | - | - |
| 2 | | | |
| ... | | | |

Карты полей (схематическое изображение в масштабе)

Вывод

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЭС-2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСТАНОВЛЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ ЗАРЯДКЕ И РАЗРЯДКЕ КОНДЕНСАТОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: исследование зависимости времени релаксации процессов зарядки и разрядки конденсаторов от ЭДС источника питания, емкости конденсатора и активного сопротивления цепи.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Если сообщить уединенному проводнику электрический заряд q , то его потенциал φ будет возрастать пропорционально заряду:

$$\varphi = \frac{q}{C} \quad (1)$$

Коэффициент C называется **электроемкостью** уединенного проводника. Выясним физический смысл этой величины.

Если заряд проводника увеличить на Δq , то потенциал увеличится на $\Delta\varphi$, причем в силу формулы (1) $\Delta\varphi = \frac{1}{C} \Delta q$.

Отсюда электроемкость уединенного проводника есть величина, численно равная заряду, который нужно сообщить проводнику для увеличения его потенциала на единицу. Таким образом, электроемкость проводника характеризует его способность накапливать электрические заряды. Она зависит от формы и размеров проводника, а также от диэлектрической проницаемости окружающей среды.

Уединенные проводники обычных размеров обладают небольшой электроемкостью. А на практике нужны устройства, которые при небольшом (относительно окружающих тел) потенциале накапливали бы на себе большие заряды. Такие устройства называются конденсаторами. Конденсатор состоит из двух проводников, называемых обкладками, которые разделены прослойкой диэлектрика.

Под **электроемкостью конденсатора** понимают взаимную электроемкость его обкладок, т.е. это есть величина, численно равная заряду Δq , который нужно перенести с одной обкладки на другую для того, чтобы изменить разность потенциалов между ними $\Delta U = \varphi_1 - \varphi_2$ на единицу:

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta U} \quad (2)$$

Электроемкость конденсатора зависит от формы, размеров и взаимного расположения обкладок, а также от диэлектрической проницаемости диэлектрика, разделяющего обкладки. Если приложить к конденсатору некоторую разность $U = \varphi_1 - \varphi_2$, то его обкладки 1 и 2 заряжаются равными по величине зарядами противоположных знаков (рис.1).

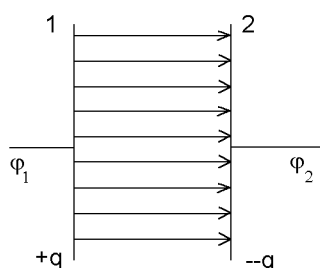


Рис.1

Для того, чтобы емкость конденсаторов была больше, используют диэлектрики с большой диэлектрической проницаемостью. Для того, чтобы емкость не зависела от тел, расположенных вблизи конденсатора, форма, размеры и расположение обкладок должны быть такими, чтобы электрическое поле конденсатора было в основном сосредоточено между обкладками.

В электрических цепях наличие конденсаторов существенно влияет на протекание процессов, поскольку конденсаторы обладают способностью накапливать заряды и энергию. При включении или выключении источника питания в цепи, обладающей емкостью и сопротивлением, протекают переходные процессы, т.е. процессы установления стационарных (неизменных) значений силы тока и напряжений на отдельных элементах цепи.

Рассмотрим процессы установления тока и напряжения в цепи при заряде и разряде конденсатора.

РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА

На рис.2 показана цепь, состоящая из последовательно соединенных конденсатора C и резистора R . Предположим, что конденсатор заряжен так, что его обкладки обладают зарядами $+q$ и $-q$, разность потенциалов между обкладками равна U_0 . Электрическое поле, сосредоточенное в пространстве между обкладками, обладает энергией

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad (3)$$

Замкнем ключ K в положение 1. Тогда по цепи пойдет ток: положительные заряды с верхней обкладки будут перемещаться по проводникам на нижнюю.

При этом разность потенциалов между обкладками будет уменьшаться, а, следовательно (в силу закона Ома), будет уменьшаться ток в цепи. Энергия электрического поля конденсатора (A) идет на нагревание резистора R . Ток в цепи будет течь до тех пор, пока вся энергия (A) не будет израсходована на нагревание.

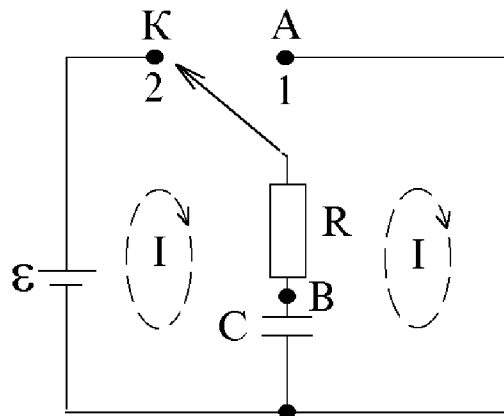


Рис.2

Рассмотрим процесс разряда конденсатора количественно.

Пусть I , q , U – мгновенные значения тока, заряда положительной обкладки и разности потенциалов между обкладками. Считая ток в проводе положительным, когда он течет от положительно заряженной обкладки к отрицательно заряженной, можем записать:

$$I = -\frac{dq}{dt} \quad RI = U \quad q = CU \quad (4)$$

где знак минус отражает факт уменьшения заряда (конденсатор разряжается). Исключая U и I , получим:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = 0 \quad (5)$$

После интегрирования этого уравнения приходим к соотношению

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}} = q_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

где q_0 – начальное значение заряда конденсатора; τ – время, в течение которого заряд конденсатора убывает в e раз.

Оно называется **временем релаксации**: $\tau = RC$.

Дифференцируя (6) по t , находим закон изменения тока во времени:

$$I = \frac{q_0}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

где $I_0 = \frac{q_0}{\tau}$ – начальное значение тока, т.е. ток при $t = 0$.

В соответствии с определением емкости имеем $q = CU$, откуда получаем закон изменения разности потенциалов во времени:

$$CU = CU_0 e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

ЗАРЯД КОНДЕНСАТОРА

Предположим, что конденсатор C полностью заряжен. Замкнем ключ K в положение 2 (рис.2). В цепи будет проходить переходный процесс, который заключается в заряде конденсатора C через резистор R . Источник \mathcal{E} возбуждает ток, заряжающий конденсатор, однако заряды на обкладках конденсатора препятствуют дальнейшей зарядке конденсатора, тем самым ограничивают прохождение тока и уменьшают его. Уравнения в этом случае имеют вид:

$$IR + U = \mathcal{E} \quad I = \frac{dq}{dt} \quad q = CU \quad (9)$$

Исключая I и U , приходим к уравнению

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

Это неоднородное дифференциальное уравнение можно свести к однородному, сделав замену $z = q - \mathcal{E}C$:

$$\frac{d}{dt}(q - \mathcal{E}C) + \frac{q - \mathcal{E}C}{RC} = 0$$

или

$$\frac{d}{dt}z + \frac{z}{RC} = 0$$

Решение этого уравнения известно:

$$z = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

или

$$q - \mathcal{E}C = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

В начальный момент времени конденсатор не заряжен, т.е. в этот момент $q = 0$. Это дает $A = -\mathcal{E}C$ и, следовательно,

$$q = \mathcal{E}C \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

При $t \rightarrow \infty$ заряд конденсатора q стремится к предельному значению

$$q_{\infty} = \mathcal{E}C = q_0 \quad (10)$$

Для тока, продифференцировав, получаем

$$I = \frac{\mathcal{E}C}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (11)$$

где $I = \frac{\mathcal{E}C}{\tau} = \frac{\mathcal{E}}{R}$ – максимальное значение силы тока в цепи.

По аналогии с разрядкой конденсатора для разности потенциалов получаем

$$U = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (12)$$

ВРЕМЯ РЕЛАКСАЦИИ

Зависимости силы тока и разности потенциалов при зарядке и разрядке конденсатора носит экспоненциальную зависимость, которая определяется величиной параметра $\tau_{теор} = RC$ (рис.3).

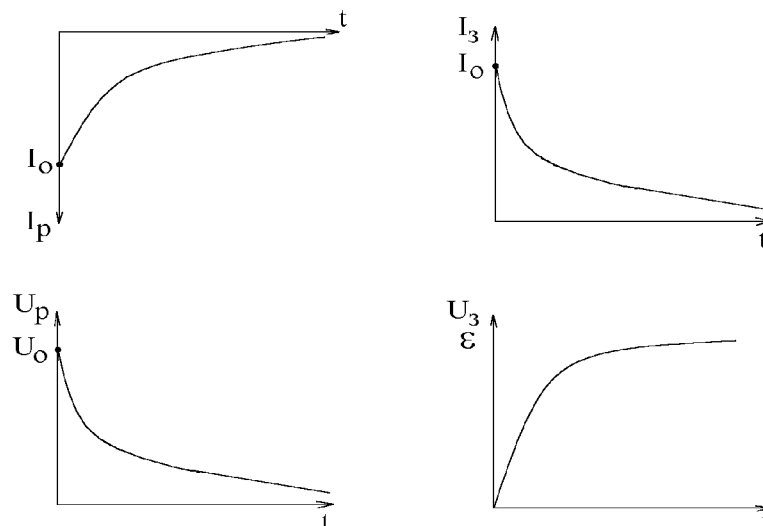


Рис.3

Это произведение имеет размерность времени. Из дифференциальных уравнений видно, что время релаксации τ есть величина обратная скорости изменения заряда на обкладках конденсатора.

$$\tau^{-1} = \frac{1}{q} \cdot \frac{dq}{dt}$$

Отсюда следует, что чем больше τ , тем медленнее будет уменьшаться с течением времени множитель $e^{-t/RC}$ и, следовательно, потребуется больше времени, чтобы заряд напряжения или ток достигли заданного уровня.

Таким образом, **физический смысл времени релаксации** состоит в том, что постоянная времени τ характеризует длительность переходных процессов, происходящих в цепи. За время $t = \tau$ заряд конденсатора либо уменьшается в e раз при разрядке конденсатора, либо достигает значения в e раз меньшего, чем максимальное q_0 при его зарядке.

Имея экспоненциальные кривые напряжения или тока, можно найти постоянную времени цепи $\tau_{экср}$. Для этого на графике $U(t)$ или $I(t)$ при разрядке и зарядке выбирают уровень $\frac{U_0}{e}$ либо $\frac{I_0}{e} \approx 0.37I_0$ (рис.4а). Либо на графике $U(t)$ при зарядке конденсатора уровень $U_0(1 - e^{-1}) \approx 0.63U_0$ и по пересечению с графиком определяют $\tau_{экср}$. (рис.4б).

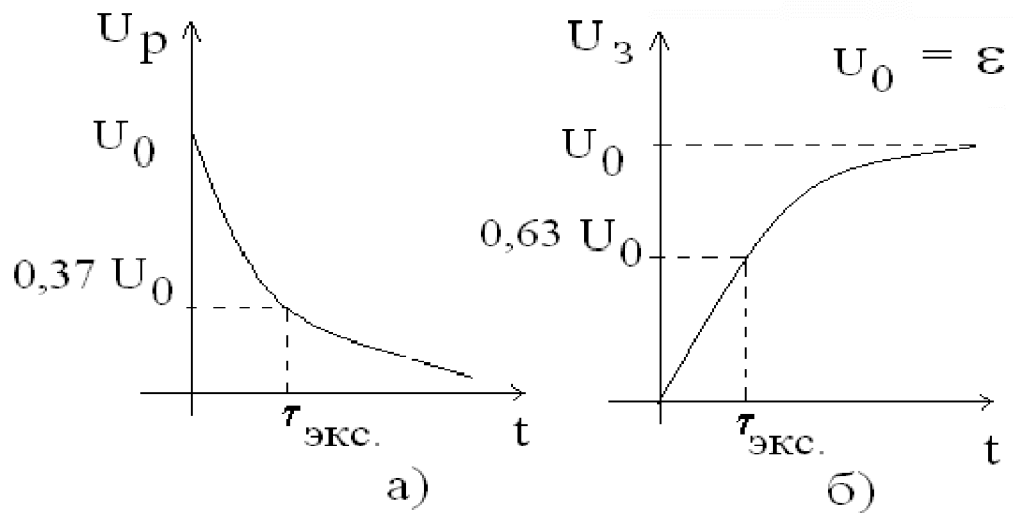


Рис.4

Исследование переходных процессов при зарядке и разрядке конденсаторов, построение экспоненциальных кривых, определение постоянной времени и является целью данной лабораторной работы.

Для проверки экспоненциальной зависимости и определения времени релаксации используют другой метод. Если прологарифмировать (8) и (12), то получим зависимости типа:

$$\ln \frac{U_0}{U} = \frac{t}{\tau} \quad \text{и} \quad \ln \frac{U_0}{U - U_0} = \frac{t}{\tau} \quad (13)$$

Построив графики зависимости $\ln \frac{U_0}{U - U_0}$ от t или $\ln \frac{U_0}{U}$ от t (рис.5),

получим прямые, тангенс наклона которых соответствует $\frac{1}{\tau_{\text{граф.}}}$.

$$\frac{1}{\tau_{\text{граф}}} = \text{tg} \alpha = \left(\frac{\Delta \left(\ln \frac{U_0}{U} \right)}{\Delta t} \right) \quad (14)$$

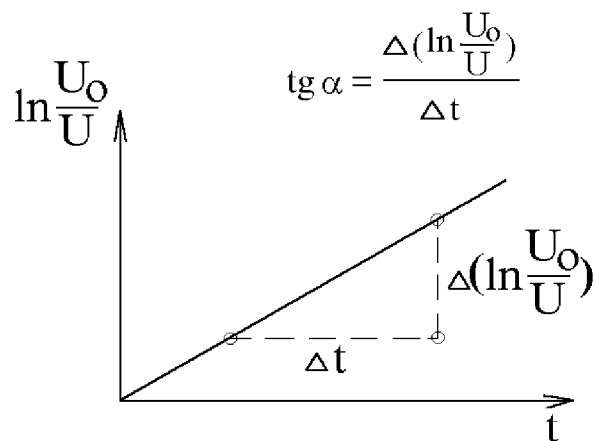


Рис.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Собрать схему.
2. На пульте переключатель «U-0-I» поставить в положение "0" (в середине).
3. На источнике питания включить тумблер "Сеть". Переключатель напряжения установить в правое положение "0-36 В" При этом вся шкала вольтметра на источнике питания станет равна 40 В.
4. На вольтметре В7-18 соединительный кабель вставить в гнездо "U<100V", нажать кнопки: "Пределы" клавишу "100", "Вид измерений" – на клавишу "U", "Вид запуска" – периодический, "Время измерений"–0,1, "Время индикации" – 1.

ЗАДАНИЕ 1

Исследование зависимости напряжения от времени при зарядке и разрядке конденсатора

1. На пульте переключатель «U-0-I» поставить в положение "U".
2. Взять у преподавателя вариант задания (таблица 3) и занести параметры в таблицу 1.
3. С разрешения преподавателя включить приборы в сеть.
4. На источнике питания и на пульте установить напряжение, сопротивление и емкость в соответствии с заданием.
5. На пульте тумблер "Зар.-Раз." перевести в положение "Зар." и записать 10-15 появляющихся через 1 секунду на табло вольтметра показаний (оставляя одну цифру после запятой).
6. По окончании измерений тумблер "Зар.-Раз." на пульте перевести в положение "Раз." и сделать еще 10-15 измерений.

7. Повторить операции 1.- 6. для всех вариантов. Данные занести в таблицу 1. При этом следует учитывать, что значения, показываемые на вольтметре, измерялись в цепи через 0,1 с, что отражено в первой колонке таблицы 1.

8. Рассчитать теоретические значения времени релаксации по формуле $\tau_{теор} = RC$. Результаты занести в таблицу 2.

9. Построить графики $U_{раз}(t)$ и $U_{зар}(t)$ для всех ε, R, C , выбрав 10-15 наиболее характерных значений табло и учитывая временные интервалы.

10. Определить по графику экспериментальные значения времени релаксации (рис.4) и занести результаты в таблицу 2.

11. Построить графики зависимости $\ln \frac{U_0}{U}$ (разрядка конденсатора) от t (или $\ln \frac{U_0}{U - U_0}$ от t (зарядка конденсатора)) для каждого из наборов ε, R, C .

(Графики можно строить на одной координатной сетке. Для построения каждой ветви достаточно выбрать 3-4 произвольные точки из таблицы 1).

12. Определить время релаксации графическим способом (рис. 5 и формула 14). Результаты вычислений занести в таблицу 2.

Таблица 1

| τ, c | $\varepsilon = \dots, R = \dots, C = \dots$ | | | | $\varepsilon = \dots, R = \dots, C = \dots$ | | | | $\varepsilon = \dots, R = \dots, C = \dots$ | | | | $\varepsilon = \dots, R = \dots, C = \dots$ | | | |
|-----------|---|------|------|------|---|------|------|------|---|------|------|------|---|------|------|------|
| | U | | I | | U | | I | | U | | I | | U | | I | |
| | Зар | Раз. | Зар. | Раз. | Зар. | Раз. | Зар. | Раз. | Зар. | Раз. | Зар. | Раз. | Зар. | Раз. | Зар. | Раз. |
| 0,1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | | | | | | | |

Таблица 2

| ε, B | $R, Ом$ | $C, мкФ$ | τ, c | | |
|------------------|---------|----------|-----------|---------|-------|
| | | | Теор. | Экспер. | Граф. |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

ЗАДАНИЕ 2

Исследование зависимости тока от времени при зарядке и разрядке конденсатора

1. На пульте переключатель перевести в положение I.
2. На вольтметре В7-19 соединительный кабель переставить в гнездо IR.

Нажать на переключателе "Пределы" клавишу "I-100"; на переключателе "Вид измерений" – клавишу "I".

3. Повторить операции 1.7.-1.10. из задания 1, записывая только целую часть показаний.

4. Построить графики зависимости $I_{раз}(t)$ и $I_{зар}(t)$ для всех значений R , C и ε .

В заключении к работе объяснить полученные зависимости напряжения и тока от времени и сравнить рассчитанные различными методами время релаксации. Проанализировать зависимость времени релаксации от ЭДС источника питания, емкости конденсатора и активного сопротивления цепи.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое время релаксации? Как его определить графически?
2. От чего зависит время зарядки конденсатора?
3. Как изменится емкость конденсатора при последовательном и параллельном соединениях?
4. От чего зависит емкость конденсатора? Что можно сделать для ее увеличения?
5. Энергия заряженного конденсатора. Можно ли использовать конденсатор в качестве источника электрической энергии? Ответ обосновать.
6. Конденсаторы, их назначение и устройство.
7. Дать определение емкости; емкости уединенного проводника.
8. Выведите уравнение зависимости $I_{зар}(t)$.
9. Выведите уравнение зависимости $I_{раз}(t)$.
10. Выведите уравнение зависимости $U_{зар}(t)$.
11. Выведите уравнение зависимости $U_{раз}(t)$.

Таблица 3

| № звена | ε , В | C, мкф | R, кОм |
|---------|-------------------|--------|--------|
| 1 | 15 | 30 | 100 |
| | 15 | 60 | 100 |
| | 15 | 30 | 200 |
| | 25 | 60 | 100 |
| 2 | 20 | 30 | 100 |
| | 20 | 60 | 100 |
| | 20 | 30 | 200 |
| | 30 | 60 | 100 |
| 3 | 25 | 60 | 200 |
| | 25 | 60 | 300 |
| | 25 | 90 | 200 |
| | 35 | 60 | 200 |
| 4 | 20 | 30 | 200 |
| | 20 | 60 | 200 |
| | 20 | 30 | 300 |
| | 30 | 30 | 200 |
| 5 | 30 | 60 | 100 |
| | 30 | 90 | 100 |
| | 30 | 60 | 300 |
| | 40 | 60 | 100 |
| 6 | 25 | 60 | 200 |
| | 25 | 60 | 300 |
| | 25 | 90 | 200 |
| | 35 | 60 | 300 |

ОТЧЕТ

по лабораторной работе по физике

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСТАНОВЛЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ ЗАРЯДКЕ И РАЗРЯДКЕ КОНДЕНСАТОРА

ФИО студента _____

Группа _____

Работа выполнена _____

Цель работы: _____

Краткая теория

1. Устройство и принцип действия конденсатора. Физический смысл емкости конденсатора. Расчет емкости плоского конденсатора, соединение конденсаторов.
2. Процессы, происходящие в конденсаторе при его зарядке. Зависимость тока в цепи и напряжения на обкладках конденсатора от времени при зарядке конденсатора.
3. Процессы, происходящие в конденсаторе при его разрядке. Зависимость тока в цепи и напряжения на обкладках конденсатора от времени при разрядке конденсатора.

Экспериментальная часть

Расчетные формулы

Расчет теоретического значения времени релаксации

Расчет экспериментального значения времени релаксации

Расчет времени релаксации графическим методом

ЗАДАНИЕ 1. Исследование зависимости напряжения от времени при зарядке и разрядке конденсатора

Таблица 1

| τ, c | $\varepsilon = \dots, R = \dots, C = \dots$ | | | | $\varepsilon = \dots, R = \dots, C = \dots$ | | | | $\varepsilon = \dots, R = \dots, C = \dots$ | | | | $\varepsilon = \dots, R = \dots, C = \dots$ | | | |
|-----------|---|----------|----------|----------|---|----------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|---|-----------|----------|-----------|
| | U | | I | | U | | I | | U | | I | | U | | I | |
| | За р. | Раз . | Зар . | Раз . | Зар . | Раз . | Зар. . | Раз. . | Зар . | Раз з. | Зар. . | Раз. . | Зар. . | Раз. . | Зар . | Раз з. |
| 0,1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | | | | | | | |

Таблица 2

| ε, B | $R, Ом$ | $C, мкФ$ | τ, c | | |
|------------------|---------|----------|-----------|---------|-------|
| | | | Теор. | Экспер. | Граф. |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

ЗАДАНИЕ 2. Исследование зависимости тока от времени при зарядке и разрядке конденсатора

Результаты занести в таблицу 1.

Вывод: _____

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЭМ-3

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Цель работы: Изучить зависимость э.д.с. индукции от силы тока, создающего переменное магнитное поле, и от ориентации контура в магнитном поле.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Электромагнитной индукцией называется явление возникновения тока в замкнутом контуре или разности потенциалов на концах разомкнутого контура при изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур.

Величина э.д.с. индукции $\mathcal{E}_{\text{инд}}$ определяется **законом электромагнитной индукции Фарадея:** э.д.с. электромагнитной индукции $\mathcal{E}_{\text{инд}}$, в замкнутом проводящем контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока Φ сквозь поверхность, ограниченную этим контуром

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Знак минус в формуле соответствует **правилу Ленца:** при всяком изменении магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную замкнутым контуром, в последнем возникает индукционный ток такого направления, что его собственное магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызвавшего индукционный ток.

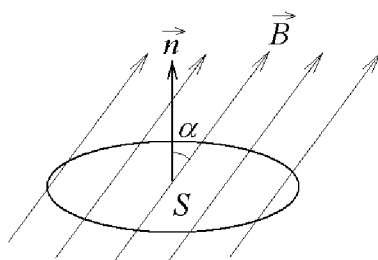


Рис.1

Величина Φ характеризует **магнитный поток** (поток вектора магнитной индукции) через поверхность, ограниченную контуром, определяется выражением

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (2)$$

где S – площадь поверхности, ограниченной контуром L , α – угол между направлением силовых линий (направлением вектора и нормалью \vec{n} к поверхности, ограниченной контуром).

Причина возникновения индукционного тока в неподвижном контуре согласно теории электромагнетизма Максвелла состоит в том, что при изменении магнитного поля возникает вихревое электрическое поле, т.е. электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями. Под действием этого поля свободные заряды контура перемещаются, т.е. в контуре возникает электрический ток, называемый индукционным током.

Описание установки

Установка (рис.2) состоит из двух одинаковых соленоидов (длинных цилиндрических катушек) K_1 и K_2 . Соленоиды соединены так, что при протекании через них электрического тока магнитные поля, создаваемые соленоидами, складываются. Между соленоидами K_1 и K_2 расположена небольшая цилиндрическая катушка K . Э.д.с. индукции, которая возникает в катушке, измеряется милливольтметром V .

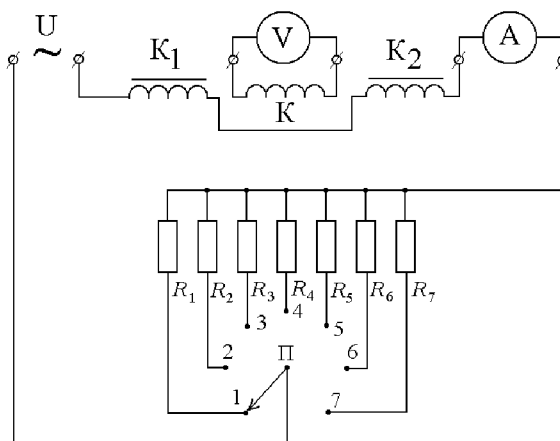


Рис.2

Установка подключается к клеммам переменного напряжения " \sim " источника питания ВС-24М. С помощью переключателя Π можно изменять величину тока в цепи, который измеряется миллиамперметром A .

Методика эксперимента

Магнитное поле создается цилиндрическими катушками K_1 и K_2 (соленоидом), по которым протекает переменный электрический ток

$$I = I_0 \cos \omega t \quad (3)$$

где I_0 – амплитудное значение тока; ω – циклическая частота тока $\omega = 2\pi\nu$; ν – частота тока. Тогда магнитная индукция B поля внутри катушки и вблизи ее торцов равна

$$B = \mu\mu_0 nI$$

или с учетом (3)

$$B = \mu\mu_0 nI_0 \cos \omega t \quad (4)$$

где μ – магнитная проницаемость сердечника катушки; μ_0 – магнитная постоянная; n – число витков катушки на единице длины. Подставив выражение (4) в формулу (2), находим магнитный поток через контур, расположенный вблизи торца катушки

$$\Phi = \mu\mu_0 n I_0 S \cos \alpha \cos \omega t$$

Отсюда скорость изменения магнитного потока равна,

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\mu\mu_0 n I_0 S \omega \cos \alpha \sin \omega t \quad (5)$$

Таким образом, скорость изменения магнитного потока пропорциональна амплитудному значению тока в катушке I_0 и косинусу угла α . Подставив выражение (5) в формулу (1), получаем

$$\mathcal{E}_{инд} = C I_0 \cos \alpha \quad (6)$$

где $C = -\mu\mu_0 n S \omega \sin \omega t$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Собрать схему согласно рис.2.
2. Установить:
 - на источнике питания ВС-24М ручку регулятора напряжения в крайнее левое положение, вращая ее против часовой стрелки;
 - на цифровом милливольтметре В7-27А переключатель в положение "10 В" (при необходимости в ходе выполнения работы можно изменять положение переключателя шкал);
 - на миллиамперметре А переключатель в положение «100»;
 - на установке переключатель П в положение "1";
 - катушку К в положение, соответствующее одному из указанных преподавателем значений угла α .
3. С разрешения преподавателя включить электропитание приборов.
4. Ручкой регулятора напряжения источника питания ВС-24М по миллиамперметру А установить ток 5 мА (либо по указанию преподавателя).
5. Записать показания миллиамперметра А и вольтметра V в таблицу 1.
6. Поочередно устанавливая переключатель П в положение 2, 3, 4, ... 7, записать показания приборов в таблицу 1.
7. Прodelать операции п.6 для остальных указанных преподавателем углов α положения катушки К.
8. Результаты измерений и вычислений оформить в виде таблицы.
9. По данным таблицы построить графики зависимости $\mathcal{E}_{инд} = f(I)$; $\mathcal{E}_{инд} = f(\cos \alpha)$.
10. В заключении к работе объяснить характер полученных зависимостей.

Таблица 1

| №№ пп | $I, \text{мА}$ | $\alpha =$ $\cos \alpha =$ | | $\alpha =$ $\cos \alpha =$ | | $\alpha =$ $\cos \alpha =$ | | $\alpha =$ $\cos \alpha =$ | |
|----------|----------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| | | $\mathcal{E},$ мВ | $\mathcal{E}_{\text{ср}},$ мВ | $\mathcal{E},$ мВ | $\mathcal{E}_{\text{ср}},$ мВ | $\mathcal{E},$ мВ | $\mathcal{E}_{\text{ср}},$ мВ | $\mathcal{E},$ мВ | $\mathcal{E}_{\text{ср}},$ мВ |
| 1. | | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2. | | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3. | | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7. | | | | | | | | | |

Контрольные вопросы

1. В чем состоит суть явления электромагнитной индукции?
2. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
3. Как определить направление индукционного тока?
4. От каких величин зависит магнитный поток Φ ?
5. Какова причина возникновения индукционного тока?
6. Почему при протекании электрического тока через соленоиды K_1 и K_2 в катушке K возникает э.д.с. индукции?

График зависимости

$$\varepsilon_{\text{инд}} = f(I)$$

График зависимости

$$\varepsilon_{\text{инд}} = f(\cos \alpha).$$

Вывод: _____

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ЭМ-4

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО И КРУГОВОГО ТОКА

Цель работы: Исследовать зависимость магнитной индукции поля прямолинейного проводника с током и кругового тока от расстояния до источника поля.

Краткая теория

Магнитное поле создается: 1) движущимися заряженными частицами и телами; 2) проводниками с током; 3) намагниченными телами; 4) переменными электрическими полями.

Магнитное поле оказывает силовое воздействие на: 1) движущиеся заряженные частицы и тела; 2) проводники с током; 3) намагниченные тела. Силовой характеристикой магнитного поля (аналогичной напряженности электрического поля \vec{E}) является вектор магнитной индукции \vec{B} . Определение магнитной индукции \vec{B} основывается на силовом действии магнитного поля на небольшой элемент проводника с током, либо на движущуюся заряженную частицу.

Экспериментально установлено, что силы, действующие со стороны магнитного поля на частицу либо проводник с током, подчиняются следующим закономерностям:

- сила всегда перпендикулярна вектору скорости частицы (току в проводнике);

- отношение $F/(|q| \cdot v)$ (либо $F/(I \cdot l)$) не зависит от величины заряда q и модуля v (либо от I и l);

- при изменении направления скорости частицы в каждой точке поля модуль силы меняется от 0 до максимального значения, которое зависит не только от q и v (I и l), но также от силовой характеристики магнитного поля – вектора \vec{B} , называемого магнитной индукцией.

По определению вектор \vec{B} численно равен отношению силы, действующей на заряженную частицу со стороны магнитного поля, к произведению абсолютного значения заряда и скорости частицы, если направление скорости частицы таково, что эта сила максимальна. Вектор \vec{B} направлен перпендикулярно к проводнику и к направлению силы, причем из конца вектора \vec{B} вращение по кратчайшему пути от направления силы к направлению тока в проводнике должно быть видно происходящим против часовой стрелки (рис.1).

$$B = \frac{F_{\max}}{|q|v} \quad (1)$$

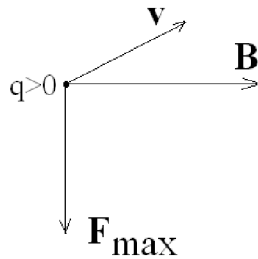


Рис.1

Естественным образом определяются понятия стационарного и однородного магнитного поля. Магнитное поле называется **стационарным**, если магнитная индукция \vec{B} в каждой точке поля не изменяется с течением времени. Магнитное поле

называется **однородным**, если во всех его точках векторы магнитной индукции одинаковы как по модулю, так и по направлению.

Для графического изображения магнитного поля вводят силовые линии или линии магнитной индукции. Силовыми называют линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} в этой точке. Магнитные силовые линии замкнуты, что означает отсутствие в природе магнитных зарядов. Направление линий индукции определяется по **правилу буравчика (правого винта)**: если ввинчивать буравчик по направлению тока в проводнике, то направление рукоятки буравчика укажет направление линий магнитной индукции.

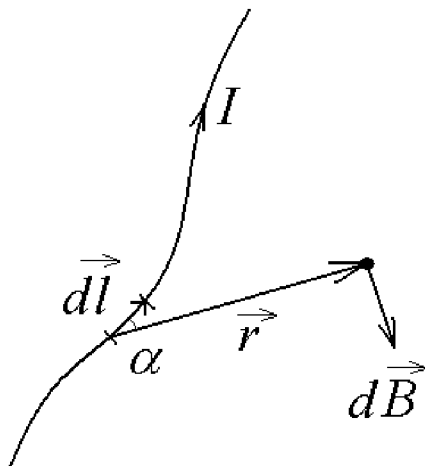


Рис.2

Для нахождения магнитной индукции поля проводника с током используется закон Био-Савара-Лапласа и принцип суперпозиции. **Закон Био-Савара-Лапласа** устанавливает величину и направление вектора магнитной индукции $d\vec{B}$ в произвольной точке C магнитного поля, создаваемого в вакууме элементом проводника длиной $d\vec{l}$ с током I (рис. 2):

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I [d\vec{l} \vec{r}]}{r^3} \quad (2)$$

где $d\vec{l}$ – вектор, численно равный $d\vec{l}$ и проведенный в направлении тока; r – радиус-вектор, проведенный из элемента проводника в рассматриваемую точку поля C; μ_0 – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость среды, в которой находится проводник с током (для вакуума и воздуха $\mu=1$). Из формулы (2) следует, что численное значение вектора магнитной индукции равно:

$$dB = |d\vec{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2} \quad (3)$$

где α – угол между векторами $d\vec{l}$ и r . Согласно **принципу суперпозиции**, магнитные индукции полей отдельных проводников с током векторно складывается:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$$

причем каждый из проводников с током создает поле, совершенно не зависящее от наличия других проводников с током.

С помощью закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции можно рассчитать **магнитное поле прямолинейного тока**. Численное значение магнитной индукции поля, создаваемого прямолинейным тонким бесконечно длинным проводником с током силой I равно:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{a} \quad (4)$$

где a – расстояние от проводника.

Силовые линии представляют собой концентрические окружности (рис. 3). Направление вектора \vec{B} определяется по правилу векторного произведения (по правилу буравчика).

Рассмотрим сейчас **магнитное поле, создаваемое круговым током**, который протекает по тонкому проводнику, имеющему форму окружности радиуса R .

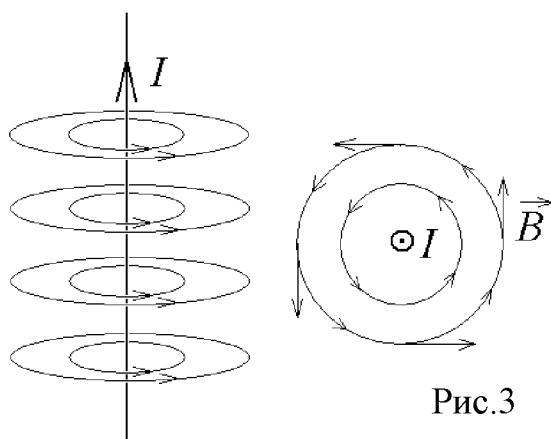


Рис.3

Значение магнитной индукции поля в точке C на оси тока на расстоянии от центра тока (рис. 4) равно

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\vec{p}_m}{(R^2 + l^2)^{3/2}} \quad (5)$$

где величина

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} \quad (6)$$

представляет собой **магнитный момент кругового контура с током**. В формуле (6) I – сила тока в проводнике; $S = \pi R^2$ – площадь плоской поверхности, ограниченной контуром; \vec{n} – вектор нормали к плоскости контура.

Направление вектора \vec{n} определяется направлением тока по

правилу векторного произведения. Силовые линии магнитного поля кругового тока изображены на рисунке 4.

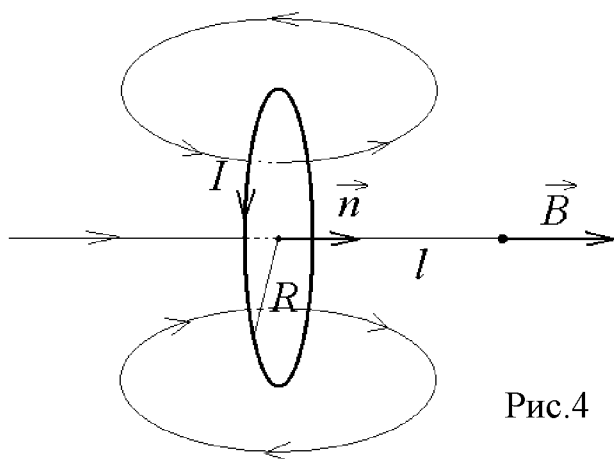


Рис.4

Методика исследования

Для измерения магнитной индукции в данной работе используется индукционный датчик, соединенный с чувствительным вольтметром. Датчик представляет собой небольшую цилиндрическую катушку с сердечником из электротехнической стали. Действие датчика основано на явлении электромагнитной индукции: при изменении магнитного потока Φ пронизывающего виток датчика, в нем возникает э.д.с. ε_i , равная со знаком минус скорости изменения потока, т.е.

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Суммарная э.д.с. индукции, которая возникает в датчике, содержащем N витков, будет в N раз больше:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

Если магнитное поле создается проводником с переменным током,

$$I = I_0 \sin \omega t \quad (8)$$

то магнитная индукция \vec{B} этого поля также изменяется по гармоническому (синусоидальному) закону:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \sin \omega t \quad (9)$$

в формулах (8), (9) $\omega = 2\pi\nu$ - циклическая частота; ν - частота; I_0 и $|\vec{B}_0|$ есть соответственно амплитудные значения тока и магнитной индукции.

Согласно определению магнитный поток Φ через поперечное сечение датчика площадью S равен:

$$\Phi = B_n S \quad (10)$$

где B_n - проекция вектора магнитной индукции \vec{B} на направление нормали \vec{n} к площадке (см.рис.7). подставим (9) и (10), получим

$$\Phi = B_{0n} S \sin \omega t \quad (11)$$

где B_{0n} - проекция вектора B на направление нормали \vec{n} . Из формул (7) и (11) находим

$$\varepsilon_i = -NB_{0n} S \omega \cos \omega t \quad (12)$$

Вольтметр, подключенный к датчику, измеряет действующее (эффективное) значение напряжения U на датчике.

В силу формулы (10)

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} NB_{0n} S \omega \mu$$

Отсюда

$$B_{0n} = \frac{\sqrt{2}U}{\mu NS \omega} \quad (13)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Задание 1. Изучение магнитного поля кругового тока

1. На пульте второй тумблер поставить в положение «Круг.».
2. Шкалу вольтметра установить равной 100 мВ. В дальнейшем при необходимости следует переключать предел измерения напряжения на 30 мВ и менее.
3. Включить вольтметр и лабораторную установку в сеть.
4. Для 6-10-и выбранных точек на оси линейки с помощью датчика произвести измерение ЭДС индукции в каждой точке. Датчик располагать так, чтобы силовые линии были перпендикулярны плоскости датчика. (Плоскость поперечного сечения датчика параллельна плоскости круга).
5. Результаты измерений занести в таблицу 1.
6. Рассчитать значения индукции магнитного поля по формуле (13). Необходимые для расчета данные приведены в таблице 3.
7. Построить графики зависимости $B = f(l)$ и $B = f\left((R^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}\right)$.

Таблица 1.

| Номер точки | l , см | $(R^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}$, м ³ | U , мВ | B , мкТл |
|-------------|----------|--|----------|------------|
| 1 | 0 | | | |
| 2 | - | | | |
| . | - | | | |
| . | . | | | |

Задание 2. Изучение магнитного поля прямолинейного проводника с током

1. На пульте второй тумблер поставить в положение «Прям.».
2. Для 4-8-и выбранных точек на плоскости планшета с помощью датчика измерить ЭДС индукции. Датчик располагать так, чтобы силовые линии были перпендикулярны плоскости датчика.
3. Результаты измерений занести в таблицу 2.
4. Рассчитать значения индукции магнитного поля по формуле (13).
5. Построить графики зависимости $B = f(r)$ и $B = f(r^{-1})$.

Таблица 2.

| Номер точки | r , м | r^{-1} , м ⁻¹ | U , мВ | B , мкТл |
|-------------|---------|----------------------------|----------|------------|
| 1 | . | | | |
| 2 | . | | | |
| ... | . | | | |

В заключении к лабораторной работе делать выводы о характере зависимости от расстояния индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током и о характере изменения индукции магнитного поля кругового витка с током вдоль его оси.

Таблица 3

| | |
|------------------------------------|---|
| Число витков | $N = 325$ |
| Площадь витка | $S = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ |
| Циклическая частота тока | $\omega = 2\pi\nu = 314,16 \text{ рад/с}$ |
| Магнитная проницаемость сердечника | $\mu = 1700$ |

Контрольные вопросы

1. Как определяется направление и величина вектора магнитной индукции?
2. Дать определение ЭДС магнитной индукции.
3. Графически изобразить магнитные силовые линии прямолинейного проводника с током и кругового тока, соленоида.
4. Чем создается магнитное поле?
5. На что оказывает воздействие магнитное поле?
6. Чему равен модуль вектора \vec{B} по определению?
7. Что такое стационарное магнитное поле?
8. Что такое однородное магнитное поле?
9. Что такое магнитные силовые линии?
10. Запишите формулу закона Био-Савара-Лапласа.
11. В чем смысл принципа суперпозиции для магнитного поля?

ОТЧЕТ

по лабораторной работе по физике

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО И КРУГОВОГО ТОКА

ФИО студента _____

Группа _____

Работа выполнена _____

Цель работы: _____

Краткая теория

1. Закон Био-Савара-Лапласа и его применение для расчета индукции магнитного поля от проводников различной конфигурации.
2. Принцип суперпозиции для расчета вектора магнитной индукции. Правило правого винта.
3. Влияние среды, в которой находится проводник с током, на магнитное поле.
4. Графическое изображение магнитных полей
5. Определение магнитного момента кругового витка с током

Экспериментальная часть

Задание 1. Изучение магнитного поля кругового тока

Расчетные формулы

Определение магнитной индукции поля (В)

Таблица 1

| Номер точки | l , м | $(R^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}$, м ³ | U , мВ | B , мкТл |
|-------------|---------|--|----------|------------|
| 1 | 0 | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |

Графики зависимости $B = f(l)$ и $B = f\left((R^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}\right)$.

Вывод

Задание 2. Изучение магнитного поля прямолинейного проводника с током

Таблица 2.

| Номер точки | r , м | r^{-1} , м ⁻¹ | U , мВ | B , мкТл |
|-------------|---------|----------------------------|----------|------------|
| 1 | 0,02 | | | |
| 2 | . | | | |
| 3 | . | | | |
| 4 | . | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |

Графики зависимости $B = f(r)$ и $B = f(r^{-1})$.

Вывод

ЭМ-5 ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

Цель работы: изучить зависимость магнитной индукции поля в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля.

При выполнении работы необходимо знать:

1. Магнитные моменты электронов и атомов.
2. Закон электромагнитной индукции.
3. Явление самоиндукции и взаимоиндукции.
4. Магнитное поле соленоида.

Краткая теория

Магнетиками называются все вещества, способные намагничиваться во внешнем магнитном поле, т.е. создавать собственное магнитное (внутреннее) магнитное поле самого вещества. Магнетики подразделяются по своим свойствам на слабомагнитные и сильномагнитные вещества.

К слабомагнитным веществам относятся парамагнетики и диамагнетики. Основную группу сильномагнитных веществ составляют ферромагнетики. Для характеристики явления намагничивания веществ вводится величина I называемая намагниченностью вещества. Намагниченность определяется по формуле:

$$I = \frac{B}{\mu_0} - H,$$

где B_0 – индукция магнитного поля в вакууме; B – индукция магнитного поля в веществе; μ – относительная магнитная проницаемость вещества; H – напряженность магнитного поля (А/м^2); μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м.

Для слабомагнитных веществ μ незначительно отличается от единицы: для парамагнетиков $\mu \geq 1$, для диамагнетиков $\mu \leq 1$. Для сильномагнитных веществ $\mu \gg 1$ и зависит от B_0 (рис.1).

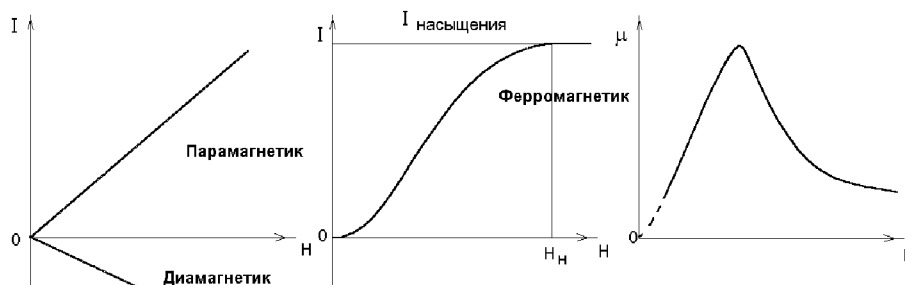


Рис. 1.а.

Рис. 1.б.

Рис. 1.в.

Рис.1.

Диамагнетики – это вещества, у которых в отсутствие внешнего поля результирующий магнитный момент каждой молекулы равен нулю. Под

действием внешнего магнитного поля в электронных оболочках атомов индуцируются (возникают) магнитные моменты, направленные против внешнего поля.

Примером является атом гелия, другие инертные газы, многие металлы (золото, медь, серебро), вода, стекло. Для этих веществ μ не зависит от температуры.

Парамагнетики – это вещества, у которых в отсутствие внешнего поля результирующий магнитный момент каждой молекулы отличен от нуля. Под действием внешнего магнитного поля устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов молекул вдоль силовых линий внешнего поля. К парамагнетикам относятся кислород, окись азота, алюминий, платина. Для парамагнитных веществ μ зависит от температуры и убывает с повышением ее по закону

$$\mu = 1 + \frac{C}{T},$$

где T – абсолютная температура; C – постоянная Кюри, характерная для данного вещества.

Ферромагнетики – это вещества, способные обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля. У ферромагнитных веществ (железо, никель, кобальт) собственное магнитное поле имеет индукцию в сотни и тысячи раз большую, чем индукция внешнего магнитного поля, вызвавшего явление намагничивания.

Для ферромагнетиков характерно также явление магнитного гистерезиса – отставание изменения магнитной индукции от изменения напряженности внешнего поля, обусловленное зависимостью магнитной индукции от ее предыдущих значений. Другими словами, связь между магнитной индукцией и напряженностью внешнего магнитного поля является неоднозначной, она определяется предшествующей историей намагничивания ферромагнетика.

Возьмем не намагниченный образец и будем его намагничивать, увеличивая напряженность магнитного поля H от нуля до некоторого значения H_1 (см.рис.2). При этом значение магнитной индукции B в образце будет изменяться вдоль кривой 01 . Начиная с некоторого значения H_H намагниченность практически остается постоянной (рис.1.б).

Если затем уменьшать напряженность внешнего поля от H_1 до $-H_1$, то кривая намагничивания не пойдет по прежнему пути 10 , а пойдет выше, по пути 1234 .

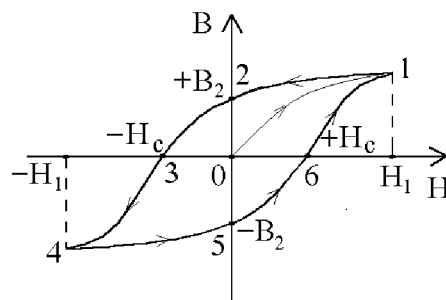


Рис.2

Если дальше изменять напряженность поля от $-H_1$ до $+H_1$, то кривая намагничивания пройдет ниже по пути 456 и вернется в точку 1 . В результате получится замкнутая кривая 01234561 , называемая петлей гистерезиса. Таким образом, петлей гистерезиса называется замкнутая кривая, изображающая зависимость магнитной индукции от напряженности внешнего магнитного поля при изменении напряженности от $+H_1$ до $-H_1$ и обратно. Из рис.2 видно, что при $H=0$ индукция B не обращается в нуль, а равна величине B_2 , изображенной отрезком 02 или 05 . Магнитная индукция поля, сохраняющегося в ферромагнетике после снятия внешнего поля, называется остаточной магнитной индукцией. Ферромагнетик, обладающий остаточным намагничиванием, является постоянным магнитом. Для того, чтобы размагнитить образец, надо снять остаточную индукцию. Для этого необходимо создать поле противоположного направления, т.е. надо довести кривую намагничивания до точки 3 или 6 . Соответствующее этим точкам абсолютное значение напряженности магнитного поля называется задерживающей или коэрцитивной силой ферромагнетика ($+H_C$ или $-H_C$). Итак, напряженность поля, при которой магнитная индукция становится равной нулю, называется коэрцитивной или задерживающей силой.

Форма петли гистерезиса весьма сильно зависит от химического состава ферромагнитного образца и от способов его обработки. Для чистого мягкого железа, т.е. отожженного и затем медленно охлажденного, явление гистерезиса выражено слабо и петля гистерезиса очень узка. Для закаленной стали и материалов, идущих на изготовление постоянных магнитов, петля гистерезиса широкая (коэрцитивная сила велика).

Природа ферромагнетизма может быть объяснена лишь на основе квантовой теории. А именно, в ферромагнетиках действуют так называемые обменные силы, которые заставляют спиновые магнитные моменты электронов выстраиваться параллельно друг другу. В результате образуются области самопроизвольного намагничивания – домены, размеры которых составляют $10^{-3} - 10^{-2}$ см. В пределах каждого домена ферромагнетик всегда намагничен до насыщения и обладает определенным магнитным моментом. В отсутствие внешнего магнитного поля ориентация магнитных моментов разных доменов различна и их суммарный магнитный момент равен нулю.

При наличии внешнего магнитного поля домены, ориентированные по полю, растут за счет доменов, ориентированных против поля. Такой рост в слабых полях является обратимым.

В более сильных полях векторы магнитных моментов доменов поворачиваются по направлению внешнего поля. Этот процесс необратим, что и обуславливает явление магнитного гистерезиса.

Особые свойства ферромагнетика обнаруживаются только при температурах меньших некоторой называемой температурой Кюри (Θ_K).

При $T > \Theta_K$ ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком. Точка Кюри для железа 700°C , для никеля – 360°C , а для сплава пермаллоя – 70°C .

Принято различать магнитотвердые и магнитомягкие ферромагнетики. К первым относятся вещества с $H_C > 10^3 \text{ A/m}$ (широкая петля гистерезиса), ко вторым – все остальные (узкая петля гистерезиса). Твердые ферромагнетики используются для изготовления постоянных магнитов (стрелка компаса, подковообразные магниты в электроизмерительных приборах и т.д.). Мягкие ферромагнетики находят применение в тех случаях, когда необходимо переменное намагничивание (сердечники трансформаторов, электромагнитов, электромагнитное реле и т.д.), способность сохранять остаточную намагниченность, т.е. "запоминать", "сохранять" следы ранее действующего магнитного поля, используется в магнитной памяти ЭВМ, в различных логических элементах автоматики, в магнитофонах.

Вывод рабочих формул

Исследуемым ферромагнетиком является железо, из которого изготовлен сердечник, вставляемый в соленоид. Первичная обмотка соленоида питается через сопротивление R_1 током i_1 . Напряженность магнитного поля, задаваемого первичной катушкой, равна:

$$H = \frac{N_1}{l} i_1 \quad (1)$$

где l – длина соленоида, N – число витков в первичной обмотке.

Тогда напряжение на сопротивлении R_1 равно:

$$U_R = i_1 R = \frac{l R_1}{N_1} H \quad (2)$$

т.е. оно пропорционально напряженности магнитного поля. Индукцию магнитного поля можно найти следующим образом. Согласно явлению взаимной индукции во вторичной обмотке соленоида возникает ЭДС индукции:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d}{dt}(M_{12} i_1)$$

где M_{12} – коэффициент взаимной индукции. Если во вторичную обмотку включить сопротивление R_2 и емкость C , то силу тока в цепи можно определить по формуле:

$$i_2 = \frac{\varepsilon_2}{R_2},$$

где ε_2 – ЭДС, индуцируемая во вторичной обмотке.

По закону Фарадея с учетом того, что $V_{12} = \frac{S}{c\mu_0\mu N_1 N_2}$, получим:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt},$$

где N_2 – число витков во вторичной обмотке, S – площадь сечения соленоида. Тогда напряжение на конденсаторе:

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{i_2 dt}{C} = \frac{1}{R_2 C} \int \varepsilon_v dt = -\frac{N_2 S}{R_2 C} \int dB$$

Считая поле внутри соленоида однородным, получаем:

$$U_c = -\frac{N_2 S}{R_2 C} B \quad (3)$$

т.е. напряжение пропорционально B . Таким образом, напряжение на сопротивлении R_1 пропорционально H_1 , а напряжение на емкости C пропорционально B . Если эти напряжения подать соответственно на горизонтальный (X – вход) и вертикальный (Y – вход) усилители осциллографа, на его экране получится петля гистерезиса. Количественные значения коэрцитивной силы H_C , максимальной индукции $B_{нас}$ и остаточную индукцию $B_{ост}$ можно определить, зная масштабы изображения на экране, поскольку напряженность и индукция магнитного поля связаны с подаваемым напряжением как

$$H = k_x U_x; B = k_y U_y$$

где $k_x = 2,5 \cdot 10^3$ А/В, $k_y = 5$ Тл/В.

При перемагничивании часть энергии магнитного поля затрачивается на переориентировку доменов. Это вызывает потери энергии в электрических машинах, работающих на переменном токе. Плотность энергии магнитного поля равна:

$$\omega = \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2,$$

Соответственно изменение плотности энергии:

$$d\omega = \frac{1}{2} \mu \mu_0 H \cdot dH,$$

так как

$$\mu \mu_0 dH = dB,$$

то

$$d\omega = H \cdot dB,$$

Из этого следует, что работа перемагничивания образца при совершении полного цикла будет равна:

$$A_0 = \oint H dB,$$

что соответствует площади петли гистерезиса. Таким образом, площадь петли гистерезиса есть мера потерь энергии в единице объема за один цикл перемагничивания. При частоте перемагничивания ν потери в единице объема за единицу времени равны:

$$A = A_0 \nu.$$

Если петля гистерезиса содержит β клеток, то ее площадь равна

$$S_{II} = \beta k_x k_y \quad (9)$$

где k_x и k_y – цена одного деления масштабной шкалы осциллографа по оси X и Y соответственно.

Порядок выполнения работы

Задание 1.

Построение семейства динамических петель гистерезиса

1.1. Ознакомиться с органами управления и регулировки осциллографа С1–83. Установить органы управления С1–83 в следующем положении:

– переключатель вида входного сигнала канала I и канала II в положение: \approx ;

– переключатель каналов осциллографа в положение: X – Y;

– переключатель синхронизации в положение: X – Y;

– аттенюаторы канала I и канала II – в положение 50 mV;

– переключатели коэффициентов отклонения каналов в положение: X10;

– ручки плавной регулировки аттенюаторов каналов I и II должны находиться в фиксированном крайнем правом положении.

1.2. Собрать схему согласно рис.3.

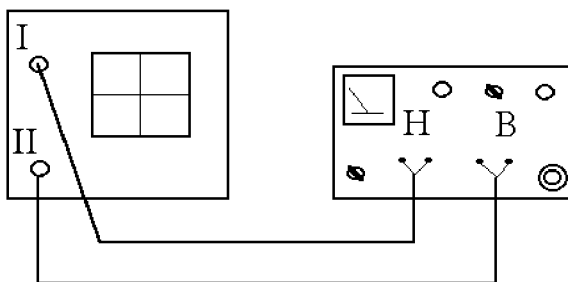


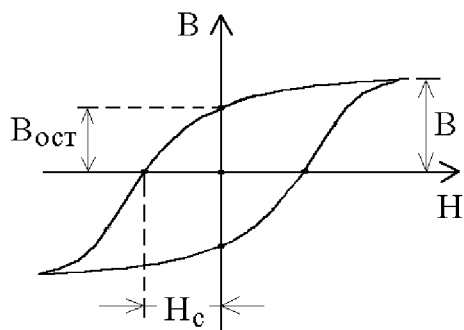
Рис.3

1.3. С разрешения преподавателя включить электропитание приборов. Получить изображение точки в центре экрана осциллографа при $H = 0$ (крайнее левое положение).

1.4. Установить переключатель частоты перемещения в положение 100 Гц.

1.5. С помощью ручки "H" установить по вольтметру напряжение 10 В.

1.6. Вставить в соленоид исследуемый образец (получить у преподавателя). С помощью ручки "B" добиться появления петли гистерезиса.



1.7. Перенести семейство пяти петель гистерезиса в выбранном масштабе на миллиметровую бумагу, изменяя H от 0 до насыщения образца H_n (следить чтобы при $H = 0$ точка была в центре экрана).

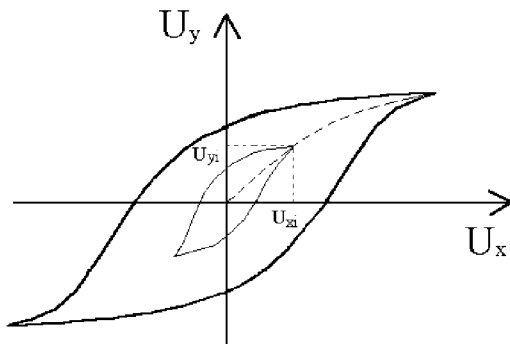
1.8. Определить остаточную индукцию $B_{ост}$ и коэрцитивную силу H_c (рис.4) для максимального значения H с учетом масштаба.

Рис.4

Задание 2.

Определение зависимости μ и I от напряженности H магнитного поля

2.1. Для определения магнитной проницаемости необходимо построить кривую начальной намагниченности как среднюю кривую, проведенную из начала координат через максимальные значения семейства кривых гистерезиса (рис.5), продолжив ее и в область насыщения, где B не изменяется с ростом H .



2.2. Выбрать на полученной кривой 10–15 точек с координатами U_{xi} и U_{yi} . Рассчитать H_i и B_i , найти магнитную проницаемость $\mu = B_i / (\mu_0 H_i)$ и намагниченность $I = \frac{B_i}{\mu_0} - H_i$. Заполнить таблицу данных.

Рис.5

| $U, В$ | $U_x, мВ$ | $U_y, мВ$ | $H, А/м$ | $B, Тл$ | μ | $I, А/м$ |
|--------|-----------|-----------|----------|---------|-------|----------|
| 1 | | | | | | |
| 20 | | | | | | |

2.3. Построить зависимости $\mu(H)$ и $I(H)$.

Задание 3.

Определение влияния частоты перемагничивания на форму петли гистерезиса

3.1. Переключатель частоты перемагничивания установить в положении 1000 Гц. Получить изображение петли гистерезиса.

3.2. Построить петлю гистерезиса для H_n , соответствующему насыщению. Сравнить работу перемагничивания образца для частоты 100 и 1000 Гц, как площади, ограниченной петлями гистерезиса.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение основных классов магнетиков.
2. В чем заключается явление магнитного гистерезиса?
3. Что называется петлей гистерезиса?
4. Что такое коэрцитивная сила ферромагнетика?
5. Что такое остаточная намагниченность?
6. Что такое домены?

Указания по технике безопасности

1. Не разрешается включать источник питания в сеть 220 В без разрешения преподавателя.
2. Не разрешается пользоваться приборами в случае повреждения изоляции или вилки кабеля питания прибора.
3. При размагничивании сердечника не держать длительное время регулятор напряжения источника питания в правом крайнем положении.

ОТЧЕТ

по лабораторной работе по физике

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

ФИО студента _____

Группа _____

Работа выполнена _____

Цель работы:

Краткая теория

1. Магнетики (определение)
2. Диамагнетики
3. Парамагнетики.
4. Ферромагнетики
5. В чем заключается явление магнитного гистерезиса
6. Работа перемагничивания образца
7. Температура Кюри

Экспериментальная часть

Задание 1. Построение семейства динамических петель гистерезиса

График пяти петель гистерезиса

Определение остаточной индукции $B_{ост}$

Определение коэрцитивной силы H_c

Задание 2. Определение зависимости μ от напряженности магнитного поля

| $N\ddot{o}$ п/п | U_x , мВ | U_y , мВ | H , А/м | B , Тл | μ | I , А/м |
|-----------------|------------|------------|-----------|----------|-------|-----------|
| 1 | | | | | | |
| . | | | | | | |
| 15 | | | | | | |

Расчетные формулы величин таблицы

график зависимости $\mu(H)$ и $I(H)$

Вывод: _____

