

Лабораторная работа №1

Исследование электростатического поля методом моделирования

ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Построение картины электростатических полей плоского и цилиндрического конденсаторов с помощью эквипотенциальных поверхностей и силовых линий поля;
2. Сравнение экспериментальных значений напряжения между одной из обкладок конденсатора и эквипотенциальными поверхностями с его теоретическими значениями.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

1. Блок питания, состоящий из понижающего трансформатора, делителя напряжения, выпрямителя и микроамперметра;
2. Электролитическая ванна с набором электродов и зондом.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Вокруг неподвижного электрического заряда или заряженного тела возникает электростатическое поле, которое характеризуется в каждой точке пространства напряженностью \mathbf{E} и потенциалом φ .

Вектор напряженности \mathbf{E} является *силовой* характеристикой поля, равной силе \mathbf{F} , с которой электрическое поле действует на единичный положительный заряд q , помещенный в данную точку поля:

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

Графически поле принято изображать с помощью *силовых линий* (линии вектора напряженности).

Силовая линия – линия, касательная к которой в каждой точке совпадает по направлению с вектором напряженности.

Густота линий выбирается так, чтобы количество линий пронизывающих единицу поверхности, перпендикулярную к линиям поля, было равно модулю вектора \mathbf{E} . Тогда по картине линий напряженности можно судить о величине и направлению вектора \mathbf{E} в разных точках пространства. В простейшем случае однородного поля $\mathbf{E} = const$ силовые линии будут параллельными прямыми, идущими с одинаковой густотой.

Энергетической характеристикой поля является **потенциал** φ , определяемый отношением потенциальной энергии W_p пробного заряда, помещенного в данную точку поля, к величине заряда q :

$$\varphi = \frac{W_p}{q} \quad (2)$$

Изменение потенциала $d\varphi$ и напряженность \mathbf{E} связаны соотношением:

$$\mathbf{E} = -\frac{d\varphi}{dx} = -\mathbf{grad}\varphi, \quad (3)$$

где dx – элементарный отрезок силовой линии, в пределах которого напряженность поля можно считать постоянной.

В частности, для однородного поля вместо малого отрезка dx можно взять отрезок Δx произвольной длины и определить напряженность:

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta x} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta x} = \frac{U}{\Delta x} \quad (4)$$

Разность потенциалов $\Delta\varphi$ на концах отрезка Δx называется также **электрическим напряжением** U .

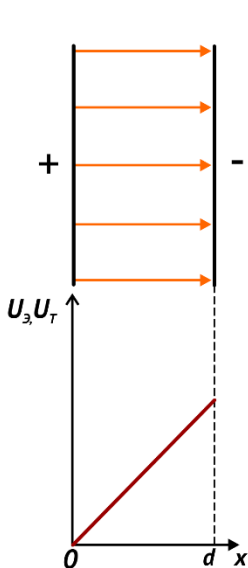


Рис.1. Поле плоского конденсатора

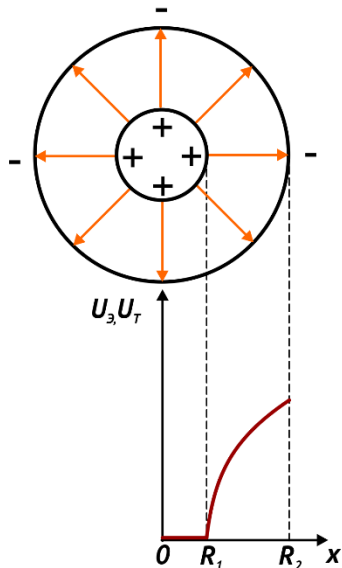


Рис.2. Поле сферического конденсатора

На **рис.1** показано электрическое поле плоского конденсатора, которое в пространстве между пластинами (за исключением краев) будет практически однородным. Согласно формуле (4) напряженность поля \mathbf{E} может быть найдена как отношение напряжения U_0 между пластинами к расстоянию d между ними:

$$E = \frac{U_0}{d} \quad (5)$$

Теоретическое значение напряжения U_T между одной из пластин конденсатора (например, левой) и точкой поля, находящейся на расстоянии x от пластины, равно:

$$U_T = Ex = \frac{U_0}{d} x \quad (6)$$

В качестве примера неоднородного поля рассмотрим поле цилиндрического конденсатора (рис.2), обкладками которого служит два коаксиальных (соосных) цилиндра с радиусами R_1 и R_2 .

Используя теорему Остроградского-Гаусса легко показать, что напряженность в точке поля, находящейся в пространстве между цилиндрами на расстоянии x от их общей оси, прямо пропорциональна заряду q , приходящемуся на единицу длины цилиндра

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 x} \quad (7)$$

Согласно формуле (3) напряжение U_T между внутренним цилиндром и точкой поля с координатой x может быть найдено путем интегрирования:

$$U_T = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{R_1}^x \frac{dx}{x} = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{x}{R_1} \quad (8)$$

А полное напряжение U_0 между обкладками:

$$U_0 = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (9)$$

Откуда:

$$\frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} = \frac{U_0}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (10)$$

$$U_T = \frac{U_0}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \ln \frac{x}{R_1} \quad (11)$$

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Ортогональность (перпендикулярность) силовых линий и поверхностей равного потенциала существенно облегчает исследование электростатического поля, так как позволяет по найденным эквипотенциальным поверхностям построить силовые линии поля, и наоборот.

Экспериментальные измерения потенциалов значительно проще, чем измерения напряженностей поля, поэтому силовые линии изучаемых полей строятся уже потом как *ортогональные* (перпендикулярные) к экспериментально найденным поверхностям равного потенциала.

При изучении распределения потенциалов в электростатическом поле обычно используется так называемый *метод зондов*. Его сущность заключается в следующем: в исследуемую точку поля вводится специальный измерительный электрод-зонд, по возможности устроенный так, чтобы он минимально нарушал своим присутствием исследуемое поле. Этот зонд соединяется с прибором, измеряющим приобретенный зондом потенциал относительно потенциала какой-нибудь точки поля принятого за нулевой.

Сложности работы с зондом и вообще трудности электростатических измерений привели к разработке метода изучения электростатических полей путем искусственного воспроизведения их структуры в слабо проводящих средах, по которым пропускается электрический ток. Таким путем прямое изучение электростатического поля заменяется изучением его, точной, но более удобной модели.

Измерение же распределения потенциалов в проводящей среде, по которой течет электрический ток, – сравнительно легкая экспериментальная задача. Надо только иметь в виду, что ток, текущий через зонд должен быть много меньше текущего в самой среде. В противном случае включение зонда исказит распределение потенциалов в исследуемом поле.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В электролитическую ванну с обычной водой помещают металлические электроды, проводимость которых много больше проводимости воды, благодаря этому потенциал во всех точках каждого электрода практически одинаков.

На зажимы электродов (см. **рис. 3**) и концы делителя подается напряжение 6 В со вторичной обмотки трансформатора, включаемого в сеть. Подвижный контакт делителя соединяется с микроамперметром и зондом.

Наличие или отсутствие тока в цепи микроамперметра зависит от потенциала точки поля, в которой находится зонд. Если он находится в такой точке поля, потенциал которой равен потенциалу, установленному на движке делителя, то тока в цепи зонда и микроамперметра не будет.

Совокупность всех точек поля, для которых ток в цепи зонда равен нулю (при данном положении движка на делителе) образует эквипотенциальную поверхность в исследуемом поле.

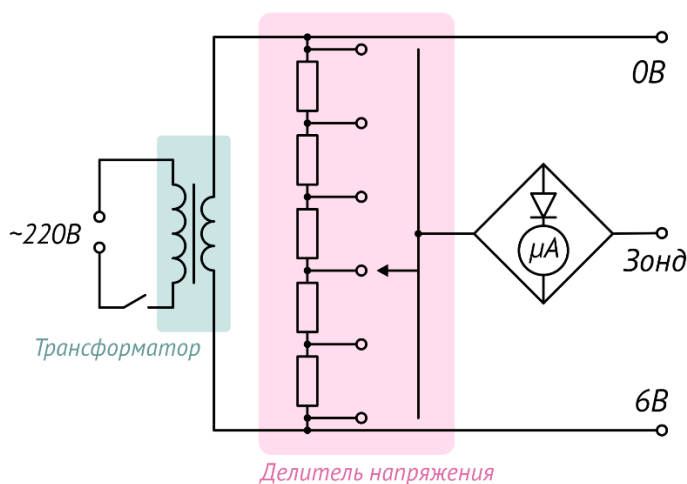


Рис. 3. Схема установки

ХОД РАБОТЫ

Задание 1. Поле двух параллельных плоских электродов.

1. Налить в ванну воду высотой 3–5 мм и установить ванну горизонтально.
2. Провести вдоль тетрадного листа бумаги ось X и положить лист на дно ванны.
3. Установить плоские электроды перпендикулярно оси на расстоянии $d = 10\text{см}$ друг от друга.
4. Присоединить левый электрод к клемме OB , а правый – к клемме $6B$, зонд-карандаш подсоединить к клемме с надписью «зонд».
5. Начертить с помощью зонда контур электродов на бумаге.
6. Установить переключатель делителя напряжения в положение 1,2В
7. Перемещая зонд, отметить на бумаге точки (одну из которых на оси X), для которых ток гальванометра равен нулю.
8. Аналогично отметить точки поля с потенциалами 2,4 ; 3,6 ; 4,8В
9. Оценить точность измерений ε_x , для чего измерение потенциала в центре поля повторить несколько раз и вычислить отношение погрешности Δx определения координаты к ее среднему значению x_{cp} :

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{cp}} \cdot 100\% \quad (12)$$

10. Разобрать схему и высушить лист бумаги.
11. Соединить точки принадлежащие одной эквипотенциальной линии плавной кривой. Начертить 6–7 силовых линий поля, равномерно располагая их начало вдоль электрода.

12. Линейкой измерить расстояние вдоль оси X от левого электрода до точек с различными потенциалами.
13. Занести данные в **таблицу 1**.
14. Используя формулу (6) рассчитать для полученных значений x величину напряжения U_T .
15. Построить график $U_T = f(x)$ и нанести на него крестиками значения $U_{\mathcal{E}}$ (см. **рис.1**).
16. Сделать вывод.

Таблица 1

$U_{\mathcal{E}}, \text{В}$	0	1,2	2,4	3,6	4,8	6
$x, \text{см}$						
$U_T, \text{В}$						

Задание 2. Поле цилиндра

1. Провести на тетрадном листе бумаги две взаимно перпендикулярные координатные оси таким образом, чтобы начало координат находилось в центре листа.
2. Установить цилиндр в центр пересечения координатных осей.
3. Начертить на бумаге наружный контур цилиндра.
4. Соединить цилиндр с клеммой OB , а внешнюю рамку с клеммой $6B$.
5. Установить делитель напряжения в положение 0 и убедиться, что поле в объеме цилиндра отсутствует.
6. Повторить пункты $6-7$ и $9-13$ задания 1, отсчитывая расстояние x от общего центра цилиндра и рамки.
7. Заполнить **таблицу 2**, вычисляя значения U_T по формуле (11).
8. Построить график $U_T = f(x)$ и нанести на него крестиками значения $U_{\mathcal{E}}$.
9. Сделать вывод.

Таблица 2

$U_{\mathcal{E}}, \text{ В}$	0	1,2	2,4	3,6	4,8	6
$x, \text{ см}$						
$U_T, \text{ В}$						

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение электростатического поля.
2. Какое поле называется потенциальным?
3. Назовите основные характеристики электростатического поля и их единицы измерения.
4. Что называется силовыми линиями поля?
5. С помощью теоремы Остроградского-Гаусса рассчитайте напряженности поля плоского и цилиндрического конденсаторов.
6. Как связаны между собой изменение потенциала и напряженность поля?
7. Докажите ортогональность силовых линий и эквипотенциальных поверхностей.
8. Что называется эквипотенциальными поверхностями?

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1990.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1989.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1988. – Т.2.