Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
“ЛЭТИ”

кафедра физики

ОТЧЕТ
по лабораторно-практической работе № 1
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ

Выполнил Бусаров А.Н
Факультет КТИ
Группа № 2305
Преподаватель

Оценка лабораторно-практического занятия					
Выполнение ИДЗ	Подготовка к лабораторной работе	Отчет по лабораторной работе	Коллоквиум		Комплексная оценка

“Выполнено” “____” ___________

Подпись преподавателя __________

Санкт-Петербург
2023

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ

Цель работы: исследование конфигурации электростатического поля; построение эквипотенциалей и линий напряженности для заданной формы электродов; приобретение навыков в применении теоремы Гаусса на примере определения электроемкости системы по экспериментально найденному распределению поля.

Приборы и принадлежности: пантограф с зондом, измерительная схема, лист чистой бумаги.

Общие сведения.

Электростатическое поле определено, если в каждой точке пространства известны величина и направление вектора напряженности Е или значение потенциала φ этого поля. В первом случае мы имеем дело с векторным представлением поля, во втором - со скалярным. Между этими представлениями существует связь, выражающаяся соотношением:

$$E = -\,grad\varphi \qquad (1.1)$$

В диэлектриках электростатическое поле характеризуется вектором электрического смещения (электрической индукции) $D = \varepsilon\varepsilon_0 E$, который удовлетворяет теореме Гаусса:

$$\oint_S DdS = Q$$

где Q - суммарный свободный заряд, заключенный в объеме, ограниченном поверхностью S. Для однородного диэлектрика

$$\oint_S \vec{E}d\vec{S} = \frac{Q}{\varepsilon\varepsilon_0} \qquad (1.2)$$

Электрическое поле потенциально, т.е. работа электрических сил по перемещению заряда не зависит от формы траектории; работа по замкнутому пути равна нулю. Математически это соответствует тому, что циркуляция вектора напряженности электростатического поля также равна нулю:

$$\oint_L Edl = 0 \qquad (1.3)$$

Соотношения (1.2) и (1.3) дают исчерпывающее описание свойств электростатического поля. В данной работе рассматриваются две типичные задачи электростатики: определение φ и E поля заданного распределения зарядов и вычисление емкости системы проводников.

Во многих случаях прямой расчет электростатического поля заменяют его моделированием. Наиболее удобной моделью является электрическое поле в проводящей среде.

Если электроды, к которым приложена разность потенциалов, помещены в проводящую среду, то в межэлектродном пространстве возникает электрический ток, плотность которого j связана с напряженностью *E.* электрического поля, установившегося в среде, законом Ома:

$$j = \gamma E, \qquad (1.4)$$

где γ - удельная проводимость среды. Таким образом, линии тока (траектории движения носителей тока в проводящей среде) совпадают с линиями напряженности электрического поля. В отсутствии сторонних сил линии тока будут перпендикулярны поверхностям равного потенциала, следовательно, соотношение (1.1) справедливо и для электрического поля в проводящей среде.

Продолжая аналогию, можно для электрического поля в проводящей среде найти соотношение, подобное теореме Гаусса (1.2). Если не рассматривать перенос заряда сторонними силами, то из очевидного выражения:

$$I = \oint_S j dS,$$

где I - ток**,** текущий от электрода; S - замкнутая поверхность, охватывающая электрод, придем к соотношению:

$$\oint_S \vec{E}_j d\vec{S} = \frac{I}{\gamma},$$

подобному (1.2). Потенциальный характер электрического поля в проводящей среде иллюстрируется соотношением:

$$\oint_L j dl = 0,$$

которое легко доказать, вычисляя, например, циркуляцию вектора j по замкнутому контуру L**,** расположенному на эквипотенциальной поверхности. Учитывая (1.4), получим подобное (1.3) выражение

$$\oint_L E_j dl = 0.$$

На основании подобия свойств векторов E и E_j можно сделать вывод о возможности моделирования электростатического поля электрическим полем в проводящей среде, если соблюдается подобие формы и расположения электродов в пространстве. Масштабные коэффициенты проводящей модели вычисляются из сопоставления тока I и заряда Q, а также удельной проводимости γ и абсолютной диэлектрической проницаемости $\varepsilon\varepsilon_0$ модели и электростатического аналога с учетом их размеров.

Электрическое поле проводящей модели определяют, измеряя распределение потенциалов в ней, после чего, используя (1.1), рассчитывают поле вектора напряженности.

Электроемкость системы электродов можно определить прямым измерением сопротивления проводящей среды между электродами. Можно показать, что

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\gamma \cdot R},$$

где R - сопротивление проводящий среды. Можно также вычислить емкость электродов с использованием теоремы Гаусса, учитывая, что $C = \frac{Q}{U}$ (U - разность потенциалов между электродами). Получаем для определения емкости

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cdot \oint_S E_j \cdot dS}{U}, \qquad (1.5)$$

где поток вектора E_j вычисляется по поверхности, охватывающей электрод моделируемой системы; U - напряжение между электродами модели; ε - проницаемость моделируемого диэлектрика. Соотношение (1.5) удобно тем, что в качестве поверхности S берется определенная на модели эквипотенциальная поверхность.

Методика измерений.

В настоящей работе моделируется плоское поле, т.е. такое, потенциал и напряженность которого зависят от двух координат. Плоским являются, например, поле двухпроводной линии или же поле, образованное заряженными плоскостью и проводником. Для описания таких полей достаточно найти распределение в плоскости, перпендикулярной к электродам, тогда полная картина поля образуется смещением полученного сечения вдоль оси, перпендикулярной к этому сечению.

В экспериментальной установке воспроизводится сечение системы электродов, формирующих один из возможных вариантов плоского поля. В качестве проводящей среды используется проводящая бумага. Электрическая схема измерительной установки приведена на рис.1.1.

Схема представляет собой мост постоянного тока, одно плечо которого образовано сопротивлениями участков ab и bc потенциометра R1 между его концевыми и подвижным контактами; другое плечо - сопротивления участков проводящей бумаги (1) между зондом (2) и электродами.

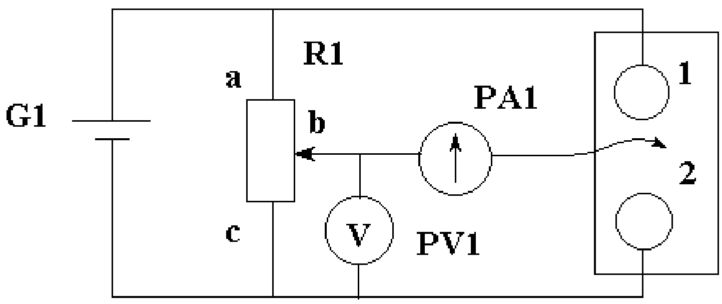
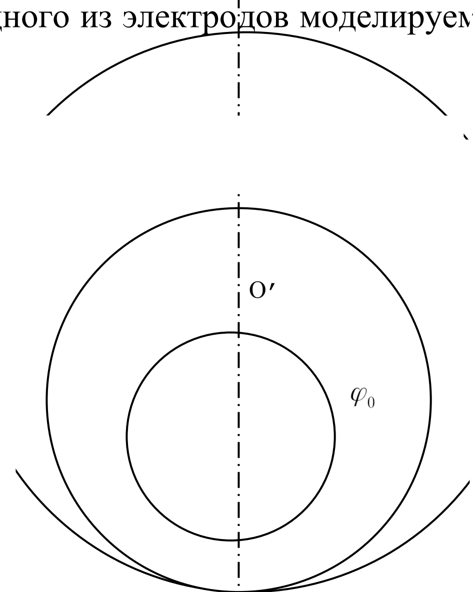


Рис. 1.1.

В диагональ моста включен микроамперметр PA1. Ток в диагонали моста равен нулю, когда падение напряжения на участке bc резистора R1. *1* равно разности потенциалов между зондом и нижним по схеме электродом. Потенциал одного электрода принимается равным нулю. Перемещая зонд по листу проводящей бумаги, можно исследовать распределение потенциала на поверхности листа. С помощью пантографа координаты зонда переносятся на чистый лист бумаги, закрепленный под вторым плечом пантографа. Если отмечать точки, соответствующие одному и тому же падению напряжения на участке *bc* резистора R1 , а затем менять его с заданным шагом $\Delta\varphi$, то в результате получится карта эквипотенциалей с шагом $\Delta\varphi$. Примерный вид карты поля около одного из электродов моделируемой системы приведен на рис. 1.2.



O φ_1

φ_2

Рис. 1.2.

Для построения линий напряженности (силовых линий) используется следующий прием. Вначале проводят линию OO' (рис.1.2), соединяющую электроды, так, чтобы она совпадала с осью симметрии поля. От точки O вдоль контура электрода откладывают отрезок $O - O_1$, равный кратчайшему расстоянию O1 от точки O до эквипотенциали φ_1, и получают точку O_1.

Затем от точки O_1 откладывают отрезок $O_1 - O_2$, равный кратчайшему расстоянию $O_1 1_1$ от точки O_1 до эквипотенциали φ_2 и получают точку O_2 и т.д. Последней точкой на контуре электрода будет та, от которой откладывается отрезок, накрывающий точку O', диаметрально противоположную точке O. Аналогичное построение проводят от точки O в другую сторону. Разделив указанным образом ближайшую к электроду эквипотенциаль, через полученные точки $1_1, 1_2, \ldots$ проводят перпендикулярные к ней отрезки до пересечения со следующей эквипотенциалью. Когда будут разделены все эквипотенциали карты поля, полученные точки следует соединить плавными линиями, соблюдая их ортогональность эквипотенциальным линиям в точках пересечения.

Для вычисления емкости, приходящейся на единицу длины рассматриваемых электродов, необходимо с помощью формулы (1.2) рассчитать поток вектора напряженности через поверхность, охватывающую единицу длины электрода. Для этого следует представить, что ближайшая к электроду замкнутая эквипотенциаль является цилиндром, образующая которого перпендикулярна плоскости листа. Полагая напряженность поля в пределах каждого из отрезков Δl_i примерно одинаковой, можно вычислить поток $\Delta\psi_i$ вектора E_i через i-й элемент поверхности цилиндра:

$$\Delta\psi_i = E_i \cdot h \cdot \Delta l_i,$$

где h - высота цилиндра, Δl_i - длина отрезка эквипотенциали, измеряемая по карте поля E_i определяется по формуле

$$E_i = \frac{\varphi_0 - \varphi}{\Delta r_i}, \tag{1.6}$$

Δr_i - расстояние между соответствующими отрезками электрода и ближайшей к нему эквипотенциалью; $(\varphi_0 - \varphi_1)$ - разность потенциалов между электродом и ближайшей к нему эквипотенциалью. Заряд, заключенный внутри замкнутой поверхности цилиндра, вычисляется по теореме Гаусса суммированием потоков $\Delta\psi_i$ через все элементы поверхности цилиндра:

$$Q = \varepsilon\varepsilon_0 \sum_i \Delta\psi_i\,.$$

Последнее соотношение используется для нахождения емкости единицы длины (погонной емкости) моделируемой системы:

$$C_h = \frac{C}{h} = \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot (\varphi_0 - \varphi_1)}{U} \right) \cdot \sum_i \frac{\Delta l_i}{\Delta r_i}. \qquad (1.7)$$

№2 Запишите, сформулируйте и объясните закон Кулона. Единица измерения заряда в СИ.

Закон Кулона утверждает, что сила взаимодействия между двумя точечными зарядами пропорциональна произведению их зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Формула закона Кулона выглядит следующим образом:

F = k * (q1 * q2) / r^2

где F - сила взаимодействия, q1 и q2 - заряды двух точечных зарядов, r - расстояние между ними, k - постоянная Кулона, которая зависит от единиц измерения.

Единица измерения заряда в СИ - это кулон. Она определяется как количество электричества, прошедшее через проводник за одну секунду при силе тока в один ампер.

№32 Чему равна сила, действующая на точечный заряд, помещенный в центр равномерно заряженной сферы?

Если поместить точечный заряд в центр равномерно заряженной сферы, то на него не будет действовать никакая сила, так как электрическое поле в этой точке равно нулю.

Сила, действующая на точечный заряд, помещенный в центр равномерно заряженной сферы, равна нулю.