

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)»

кафедра физики

ОТЧЕТ
по лабораторной работе № 1
«ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ
МОДЕЛИРОВАНИЯ
В ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ»

Выполнила: Завьялов Никита Сергеевич

Группа № 2311

Преподаватель: Овезов Максат Кемалович

Вопросы		Задачи ИДЗ					Даты коллоквиума	Итог

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 емкости системы по экспериментально найденному распределению поля.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: пантограф с зондом, измерительная схема, лист чистой бумаги.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Электростатическое поле определено, если в каждой точке пространства известны величина и направление вектора напряженности E 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

$$\mathbf{E} = - \text{grad } \varphi. \quad (1.1)$$

В диэлектриках электростатическое поле характеризуется вектором электрического смещения (электрической индукции) $\mathbf{D} = \epsilon\epsilon_0 \mathbf{E}$, который

удовлетворяет теореме Гаусса:

$$\oiint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = Q,$$

где Q – суммарный сторонний заряд, заключенный в объеме, ограниченном поверхностью S . Для однородного диэлектрика

$$\oiint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{Q}{\epsilon\epsilon_0}, \quad (1.2)$$

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:

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0, \quad (1.3)$$

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 j которого связана с напряженностью E электрического поля, установившегося в среде, законом Ома:

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}, \quad (1.4)$$

где γ – удельная проводимость среды.

Таким образом, линии тока (траектории носителей тока в проводящей среде) совпадают с линиями напряженности электрического поля. В отсутствие 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

$$I = \oint_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S},$$

где I – ток, текущий от электрода, а S – замкнутая поверхность, охватывающая электрод, приходим к соотношению

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{I}{\gamma},$$

подобному (1.2). Потенциальный характер электрического поля в

проводящей среде иллюстрируется соотношением

$$\oint_L \mathbf{j} d\mathbf{l} = 0,$$

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

$$\oint_L \mathbf{E}_j d\mathbf{l} = 0.$$

На основании подобия свойств векторов \mathbf{E} и \mathbf{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 и абсолютной диэлектрической проницаемости 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.

Емкость системы электродов определяют прямым измерением сопротивления проводящей среды между электродами. Можно показать, что

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

где R – сопротивление проводящей среды.

Можно также вычислить емкость электродов с использованием теоремы Гаусса, учитывая, что

$$C = Q/U,$$

где U – напряжение, равное разности потенциалов между электродами модели, получаем для определения емкости

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \oint \mathbf{E}_j d\mathbf{S}}{U}, \tag{1.5}$$

где \mathbf{E}_j – вектор, который вычисляется по поверхности, охватывающей

электрод моделируемой системы; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость моделируемого диэлектрика.

Соотношение (1.5) удобно тем, что в качестве поверхности S берется определенная по модели эквипотенциальная поверхность.