

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
Кафедра Физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2
по дисциплине «Физика»
Тема: ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ
МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ
(циркуляция напряженности)

Студент гр. 9892 _____

Лескин К.А.

Преподаватель _____

Лоскутников В.С.

Санкт-Петербург
2020

Цель

Ознакомление с методикой моделирования электростатического поля в токопроводящей среде.

Исследование электростатического поля, созданного системой проводящих тел.

Исследование интегральных характеристик электростатического поля – поток вектора напряженности и индукции, теорема Гаусса, циркуляция вектора напряженности.

Приборы и принадлежности

Лабораторный макет установки для моделирования электростатического поля изображён на рис. 1.

В работе используется планшет 1, покрытый проводящей бумагой, с нанесенными на него металлическими электродами 2. На планшете установлены две подвижные линейки 3, с помощью которых определяются координаты щупа 4, подключенного к вольтметру PV. Помещая щуп в разные точки планшета и измеряя потенциал данной точки, можно построить картину исследуемого поля.

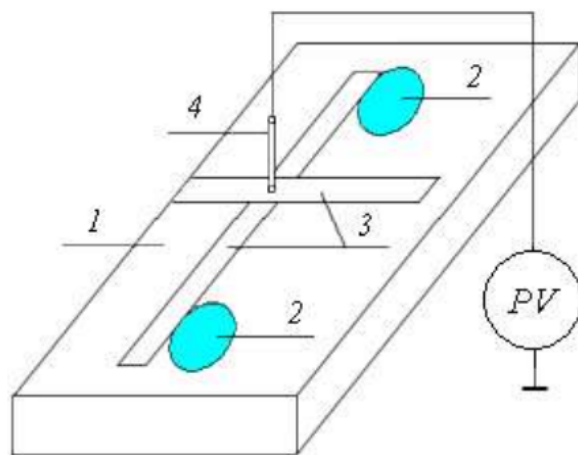


Рис. 1 – Установка для моделирования электростатического поля

Исследуемые закономерности

Модель электростатического поля

В проводящей среде под действием приложенной к электродам постоянной разности потенциалов происходит направленное движение заряженных частиц, в результате чего в среде, окружающей электроды, устанавливается стационарное распределение потенциала, подобное распределению потенциала в диэлектрической среде вокруг заряженных проводящих тел, если форма и взаимное расположение последних аналогичны соответствующим параметрам электродов проводящей модели.

$$F = qE = -q \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} n, \quad (1)$$

где n – единичный вектор в направлении максимального изменения потенциала, то в проводящей среде вектор плотности тока подчиняется вполне симметричному соотношению

$$j = -\gamma \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} n = \gamma E, \quad (2)$$

где γ – электропроводность среды (величина, обратная удельному сопротивлению).

Из сопоставления двух соотношений видно, что:

1. оба поля потенциальны, (не образуют вихрей в пространстве, окружающем электроды);
2. как линии напряженности электростатического поля, так и линии тока перпендикулярны линиям или поверхностям равного потенциала.

Поле длинной двухпроводной линии

На планшете моделируются поля, картина которых остается неизменной при параллельном переносе плоскости, в которой исследуется поле.

В данной работе исследуется поле двух длинных, параллельных, равномерно и разноименно заряженных проводящих цилиндров (двухпроводной линии).

Для каждого цилиндра напряженность поля равна

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (3)$$

Значение и направление результирующего вектора напряженности поля определяют по отношению к системе координат xOy , заданной экспериментатором.

Напряженность поля и вектор индукции

Для электростатического поля справедливо следующее соотношение между вектором напряженности поля и вектором электрической индукции

$$D = \varepsilon\varepsilon_0 E \quad (4)$$

Поток вектора индукции электрического поля (теорема Гаусса)

Поток вектора индукции электрического поля определяется выражением

$$\Phi_D = \int_S D ds = \int_S D n ds = \int_S D ds \cos(Dn) = \int_S D_n ds \quad (5)$$

где S – поверхность произвольной формы в области поля; n – единичный вектор нормали в данной точке поверхности.

Для электростатического поля справедлива теорема Гаусса

$$\oint_S D ds = \int_V \rho dV = Q_V \quad (6)$$

где S – произвольная замкнутая поверхность в области поля; V – объем области поля, ограниченный поверхностью S ; Q_V – заряд, распределенный в объеме V .

Это означает, что выражение (4) следует понимать так: *поток вектора индукции электростатического поля через замкнутую поверхность произвольной формы равен суммарному заряду, заключенному в объеме, ограниченном этой поверхностью, и не зависит от зарядов, расположенных вне данной поверхности.*

Циркуляция вектора напряженности электрического поля

В электрическом поле циркуляцией вектора напряженности называют физическую величину, которая определяется соотношением

$$\Gamma = \oint_L E dl = \oint_L E dl \cos(E\tau) = \oint_L E_l dl \quad (7)$$

где L – произвольный замкнутый контур; τ – единичный вектор касательной к линии контура в данной точке.

Протокол

| i | E_i | x , мм | y , мм |
|----|-------|----------|----------|
| 1 | 7.01 | 75.0 | 50.0 |
| 2 | 7.31 | 79.3 | 49.6 |
| 3 | 7.5 | 83.6 | 48.5 |
| 4 | 7.73 | 87.5 | 46.7 |
| 5 | 7.98 | 91.1 | 44.2 |
| 6 | 8.02 | 94.2 | 41.1 |
| 7 | 8.18 | 96.7 | 37.5 |
| 8 | 8.16 | 98.5 | 33.6 |
| 9 | 8.25 | 99.6 | 29.3 |
| 10 | 8.06 | 100.0 | 25.0 |
| 11 | 8.12 | 99.6 | 20.7 |
| 12 | 8.0 | 98.5 | 16.4 |
| 13 | 7.94 | 96.7 | 12.5 |
| 14 | 7.77 | 94.2 | 8.9 |
| 15 | 7.69 | 91.1 | 5.8 |
| 16 | 7.44 | 87.5 | 3.3 |
| 17 | 7.25 | 83.6 | 1.5 |
| 18 | 7.04 | 79.3 | 0.4 |
| 19 | 6.95 | 75.0 | 0.0 |
| 20 | 6.65 | 70.7 | 0.4 |
| 21 | 6.55 | 66.4 | 1.5 |
| 22 | 6.53 | 62.5 | 3.3 |
| 23 | 6.44 | 58.9 | 5.8 |
| 24 | 6.2 | 55.8 | 8.9 |
| 25 | 6.17 | 53.3 | 12.5 |
| 26 | 6.14 | 51.5 | 16.4 |
| 27 | 6.1 | 50.4 | 20.7 |
| 28 | 6.04 | 50.0 | 25.0 |
| 29 | 6.17 | 50.4 | 29.3 |
| 30 | 6.04 | 51.5 | 33.6 |
| 31 | 6.08 | 53.3 | 37.5 |
| 32 | 6.13 | 55.8 | 41.1 |
| 33 | 6.47 | 58.9 | 44.2 |
| 34 | 6.63 | 62.5 | 46.7 |
| 35 | 6.81 | 66.4 | 48.5 |
| 36 | 6.91 | 70.7 | 49.6 |

| i | E_i | x , мм | y , мм | Электрод | x , мм | y , мм | R , мм |
|---|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 5.52 | 50 | 180 | левый | 90 | 140 | 15 |
| 2 | 5.53 | 50 | 185 | | | | |
| 3 | 5.55 | 45 | 180 | правый | 300 | 140 | 15 |

Обработка результатов измерений

Рассчитаем вектор напряжённости:

$$E = \frac{d\varphi}{dl} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$$

$$\overline{E}_x = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = \frac{5.55 - 5.52}{0.005} = 6 \frac{B}{m}$$

$$\overline{E}_y = \frac{\Delta\varphi}{\Delta y} = \frac{5.53 - 5.52}{0.005} = 2 \frac{B}{m}$$

Рассчитаем погрешность вектора напряжённости:

$$\Delta E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{x_1 - x_2}$$

$$\Delta E_x = \sqrt{2\left(\frac{\theta_\varphi}{\Delta x}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta\varphi\theta_l}{\Delta x^2}\right)^2} = \sqrt{2\left(\frac{0.01}{0.005}\right)^2 + 2\left(\frac{0.03 * 0.001}{0.000025}\right)^2} = 3,3$$

$$\Delta E_y = \sqrt{2\left(\frac{\theta_\varphi}{\Delta y}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta\varphi\theta_l}{\Delta y^2}\right)^2} = \sqrt{2\left(\frac{0.01}{0.005}\right)^2 + 2\left(\frac{0.03 * 0.001}{0.000025}\right)^2} = 2,9$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = 6.3 \pm 4.3$$

Рассчитаем касательные составляющие для отрезков выбранного контура:

$$E_1 = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{7.31 - 7.01}{0.004} = 75.0$$

$$E_2 = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{7.73 - 7.5}{0.004} = 57.5$$

$$E_3 = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{8.02 - 7.98}{0.004} = 10.0$$

$$E_4 = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{8.16 - 8.18}{0.004} = -5.0$$

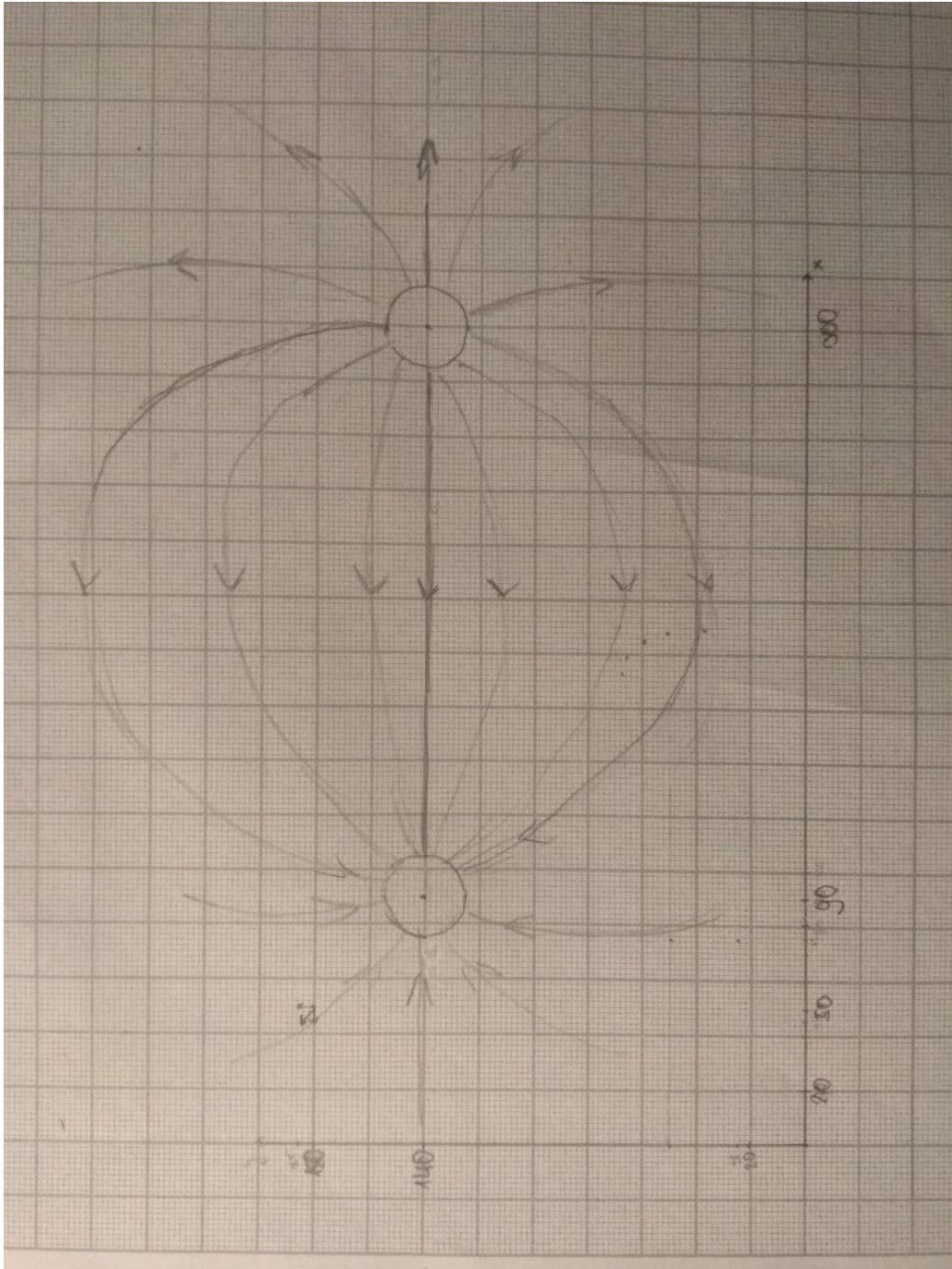
$$E_5 = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{8.06 - 8.25}{0.004} = -47.5$$

$$E_6 = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{8.0 - 8.12}{0.004} = -30.0$$

$$E_7 = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{7.77 - 7.94}{0.004} = -42.5$$

$$E_8 = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{7.44 - 7.69}{0.004} = -62.5$$

$$\begin{aligned}
E_9 &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{7.04 - 7.25}{0.004} = -52.5 \\
E_{10} &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{6.65 - 6.95}{0.004} = -75.0 \\
E_{11} &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{6.53 - 6.55}{0.004} = -5.0 \\
E_{12} &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{6.2 - 6.44}{0.004} = -60.0 \\
E_{13} &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{6.14 - 6.17}{0.004} = -7.5 \\
E_{14} &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{6.04 - 6.1}{0.004} = -15.0 \\
E_{15} &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{6.04 - 6.17}{0.004} = -32.5 \\
E_{16} &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{6.13 - 6.08}{0.004} = 12.5 \\
E_{17} &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{6.63 - 6.47}{0.004} = 40.0 \\
E_{18} &= \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{6.91 - 6.81}{0.004} = 25.0
\end{aligned}$$



Вывод

В данной лабораторной работе я осзаккомился с методикой моделирования электростатического поля. В результате работы были исследованы интегральные характеристики поля — потоки векторов напряженности и индукции.