

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2э.4

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ КОАКСИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРОВОДНИКОВ

МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ

Минск 2022

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2э.4

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ КОАКСИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРОВОДНИКОВ

Цель работы:

1. Изучить основные характеристики электростатических полей.
2. Ознакомиться с методом моделирования электростатических полей.
3. Изучить закон изменения потенциала и модуля напряженности электростатического поля цилиндра.
4. Изучить явление экранирования электростатического поля проводниками.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ

Решение ряда задач при конструировании конденсаторов, электрически перепрограммируемой памяти, фотоэлектронных умножителей и т.д. требует знания строения электростатического поля в пространстве между электродами сложной конфигурации.

Электростатическим полем называется электрическое поле неподвижных в выбранной системе отсчета зарядов. Основными характеристиками электростатического поля являются **вектор напряженности** и **потенциал**.

Вектором напряженности электрического поля \vec{E} в данной точке поля называется физическая величина, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в ту же точку: $\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q}$. Напряжен-

ность – *силовая* характеристика электростатического поля. Вектор напряженности электрического поля точечного заряда q в точке с радиусом-вектором \vec{r} может быть определен на основе закона Кулона:

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^3} \vec{r}, \quad (1)$$

где k – размерная константа, $k = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \text{ Кл}^{-2}$.

Электростатическое поле может быть наглядно изображено с помощью *силовых линий*. называются кривые линии, касательные к которым в каждой точке совпадают по направлению с вектором напряженности в той же точке поля (рис.1).

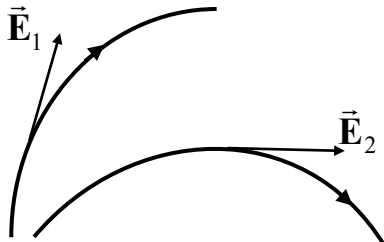


Рис.1

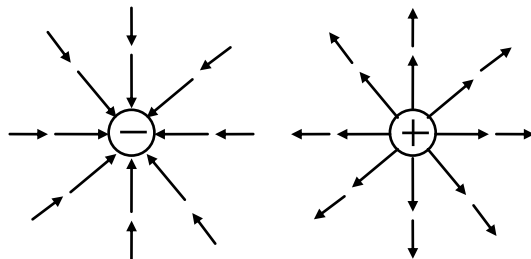


Рис.2

Число линий, пронизывающих единицу площади поверхности, перпендикулярной им, прямо пропорционально величине напряженности электрического поля в данном месте. Линии напряженности начинаются на положительном заряде (или в бесконечности) и заканчиваются на отрицательном заряде (или в бесконечности) (рис.2). Линии напряженности не пересекаются, так как в каждой точке поля вектор \vec{E} может иметь лишь одно направление.

Напряженность поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности: $\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$. Данное

соотношение выражает принцип суперпозиции для вектора напряженности электрических полей. В настоящий момент для визуализации силовых свойств электрического поля используются график векторного поля. Ниже приведен график для суперпозиций полей \vec{E} , который соответствует системе разноименных точечных зарядов (рис. 3).

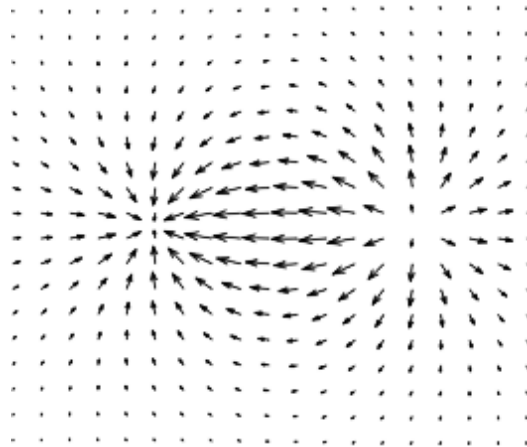


Рис.3

Потенциалом φ в данной точке поля называется скалярная физическая величина, численно равная потенциальной энергии, которой обладал бы единичный положительный заряд, помещенный в ту же точку: $\varphi(r) = \frac{W(r)}{q}$. Потенциал элек-

трического поля точечного заряда q в точке с радиусом-вектором \vec{r} может быть определен на основе закона Кулона:

$$\varphi(r) = k \frac{q}{r}. \quad (2)$$

Потенциал – *энергетическая* характеристика электростатического поля. Если нулевой уровень потенциальной энергии системы зарядов условно выбрать на бесконечности, то выражение (2) представляет собой работу внешней силы по перемещению единичного положительного заряда из бесконечности в рассматриваемую точку B :

$$\varphi(r) = \frac{A_{\infty \rightarrow B}}{q}. \quad (3)$$

Геометрическое место точек в электрическом поле, которым соответствует одно и то же значение потенциала $\varphi(x, y, z) = const$, называется *эквипотенциальной поверхностью*. Потенциал поля системы точечных зарядов равен алгебраической сумме потенциалов полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности:

$$\varphi = \sum_i \varphi_i$$

Данное соотношение выражает *принцип суперпозиции* для потенциалов электрических полей. В настоящий момент для визуализации скалярной характеристики электрического поля используются *контурные графики*, которые соответствуют эквипотенциальным линиям $\varphi(x, y) = const$.

На (рис.5). приведен контурный график для суперпозиции полей, которые соответствуют системе двух разноименных точечных зарядов. Эквипотенциальные линии на нем показаны сплошным.

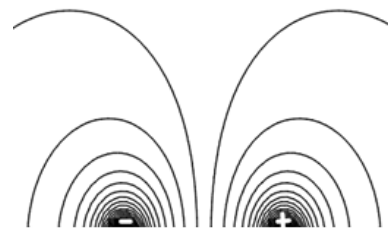


Рис.4

Рассмотрим перемещение единичного заряда вдоль эквипотенциальной линии произвольного электростатического поля (рис.5): работа сил поля в этом случае равна нулю: $\delta A = -d\varphi = 0$, так как нет изменения потенциальной энергии заряда.

С другой стороны, работу по перемещению единичного заряда можно определить как $\delta A = \vec{E} \cdot d\vec{l} = E dl \cos(\alpha)$. Решая систему получаем, что $\cos(\alpha) = 0$, то есть сила, действующая на единичный заряд, все время перпендикулярна вектору перемещения $d\vec{l}$. Следовательно, вектор напряженности поля в каждой точке перпендикулярен эквипотенциальной линии, что изображено на рис.6.

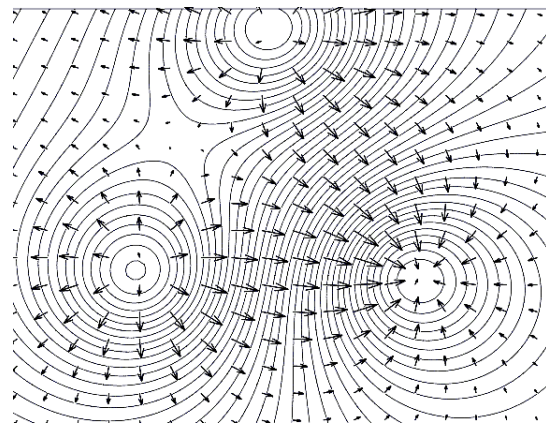


Рис.5

Для произвольного перемещения $d\vec{l}$ проекция вектора напряженности поля E_s на это направление находится из решения уравнения

$$E \cos(\alpha) \cdot dl = E_l \cdot dl = -d\varphi, \quad \text{как} \quad E_s = -\frac{d\varphi}{dl}, \quad (4)$$

то есть, равна взятому с обратным знаком приращению потенциала на единицу длины в направлении вектора $d\vec{l}$. В декартовой системе координат вектор напряженности \vec{E} может быть разложен по ортонормированному базису: $\vec{E} = \vec{i} E_x + \vec{j} E_y + \vec{k} E_z$. Подставляя в это разложение проекции вектора \vec{E} в виде (4), получаем связь между напряженностью \vec{E} и потенциалом электрического поля φ :

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \vec{k} \right). \quad (5)$$

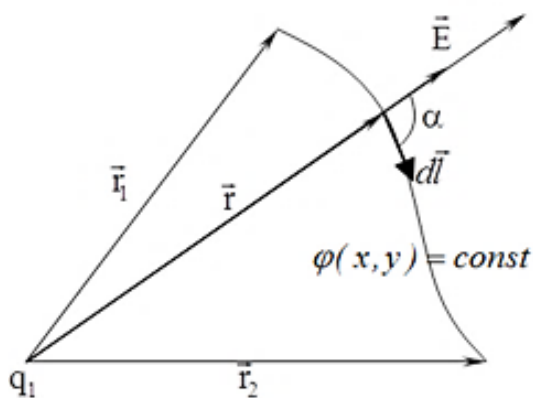


Рис.6

Аналитический расчет поля удастся только в наиболее простых случаях. Сложные электростатические поля исследуются обычно экспериментально методом моделирования.

Метод изучения электростатического поля путем создания другого эквивалентного ему поля называется *моделированием*.

Прибегать к изучению эквивалентного поля приходится из-за того, что прямое изучение электростатического поля сопряжено с рядом технических трудностей.

В данной работе экспериментальное изучение строения электростатического поля заменяется простыми и более точными измерениями характеристик поля стационарных токов (постоянных во времени электрических токов). В качестве характеристики такого поля используется вектор плотности тока \vec{j}_T .

В соответствии с локальной формулировкой закона Ома: $\vec{j}_T = \sigma \vec{E}$, где σ – электропроводность среды. В этом случае векторы \vec{j}_T и \vec{E} являются коллинеарными. Электрическое поле стационарных токов, как и электростатическое, является потенциальным. Вектор напряженности \vec{E} электростатического поля всегда перпендикулярен поверхности проводника. Вектор \vec{E} поля стационарных токов также перпендикулярен поверхности электродов любой формы, если удельная электропроводность окружающей среды намного меньше удельной электропроводности вещества электродов.

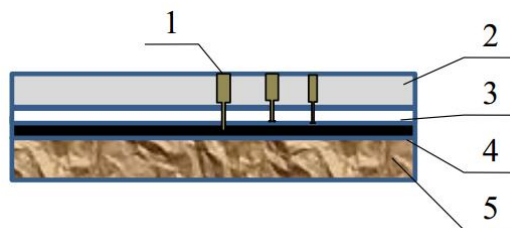
При моделировании эквивалентных векторных полей \vec{j}_T и \vec{E} форма и расположение электродов модели и электрических зарядов совпадают. Пространство между электродами заполняется однородной слабо проводящей средой, например, электропроводная бумага или лак. Измерения потенциалов между электродами осуществляется при помощи зонда. Искажения электрического потенциала, связанные с размерами зонда, оказываются незначительными при измерениях на модели, изготовленной в сильно увеличенном масштабе.

С помощью зондов удобно исследовать плоское поле, когда потенциал φ и вектор \vec{E} напряженности электрического зависят от двух координат. Исследование такого поля требует измерения потенциала или напряженности только в одной из плоскостей. К рассматриваемым полям относятся поле электрического диполя, плоского цилиндрического конденсатора, поле системы параллельных проводников и другие.

Макеты представляют собой плоские поверхности токопроводящего лака или электропроводной бумаги, на которой закреплены плоские металлические электроды, подсоединенные к источнику постоянного тока. Электропроводная бумага – это обычная бумага, в составе которой имеются соприкасающиеся друг с другом частицы графита или сажи.

Ниже приводится схема устройства применяемого макета:

- 1 – точечные металлические контакты,
- 2 – органическое стекло,
- 3 – бумага,
- 4 – слабо проводящая бумага,
- 5 – плита ДСП.



Поле стационарных токов на токопроводящей поверхности является плоским полем вектора \vec{j}_T . Разность потенциалов между произвольными точками поля измеряется с помощью зонда, соединенного с вольтметром или другим измерительным прибором.

В данной работе экспериментально изучается закон изменения величины потенциала электростатического поля коаксиальной системы проводников (рис.7).

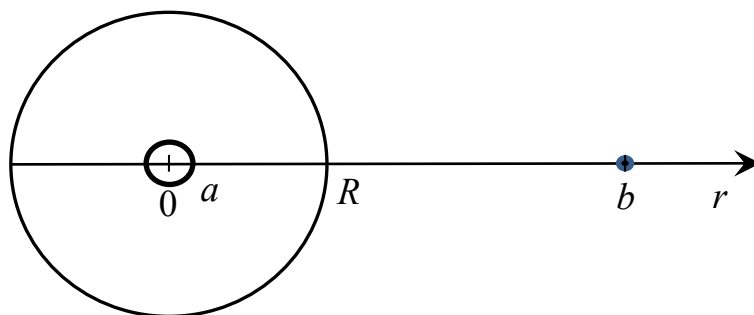


Рис.7

В силу симметрии расположения проводников величины потенциала φ и модуля вектора $|\vec{E}|$ зависят только от одной переменной, которую обозначим r .

Исследуемая система состоит из двух металлических пустотелых, коаксиальных цилиндров с радиусами a и R , соответственно, причем их высота пренебрежимо мала по сравнению с радиусами. В координатной точке на удалении b от начала координат находится дополнительный электрод. Для построения функции потенциала заряженного объекта сначала найдем с помощью теоремы Гаусса $\int_0^{S_{\text{ц}}} \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$ модуль вектора напряженности электростатического поля \vec{E} на оси Ox .

Рассмотрим определение величины напряженности электростатического поля между точками a и R . Через произвольную точку с радиусом $a < r < R$

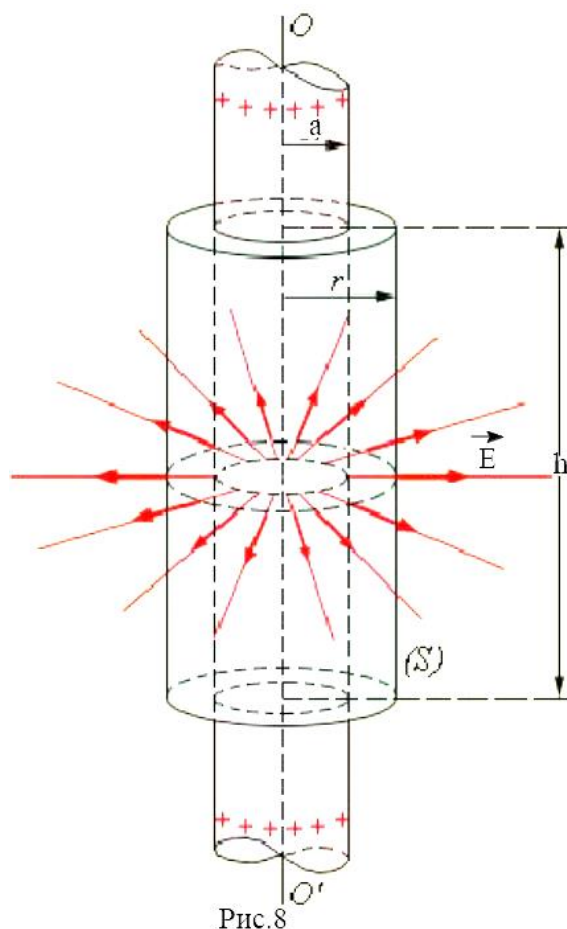


Рис.8

проведем цилиндрическую поверхность S , рассмотрим цилиндр высотой $h \ll r$ (рис.8).

В соответствии с теоремой Гаусса вычисляем

$$\int_0^{S_{\text{ц}}} \vec{E} d\vec{S} = \int_0^{S_{\text{бок}}} E dS \cos 0 = ES_{\text{бок}} = E2\pi rh.$$

Слагаемые из этого интеграла по основаниям цилиндра обращаются в ноль:

$$\int_0^{S_{\text{осн}}} E dS \cos \frac{\pi}{2} = 0.$$

Рассмотрим отдельно правую часть теоремы: $\frac{q}{\epsilon_0} = \frac{\lambda_a}{\epsilon_0} 2\pi ah$, здесь λ_a

– поверхностная плотность заряда с учетом того, что $h \ll a$. Подставляя полученные

результаты в теорему, находим напряженность электростатического поля в

области $a < r < R$: $E = \frac{\lambda_a a}{\epsilon_0 r}$. Повторяем

процедуру расчета для случая, когда заряд

имеется на двух цилиндрах одновременно. В

области $a < r < R$, величина напряженности

резльтирующего электростатического поля

будет определяться только зарядом цилиндра

радиуса a : $E_1 = \frac{\lambda_a a}{\epsilon_0 r}$.

В области $r > R$, вследствие суперпозиции двух полей получаем:

$$E_2 = \left(\frac{\lambda_a a}{\varepsilon_0} + \frac{\lambda_R R}{\varepsilon_0} \right) \frac{1}{r}, \quad (7)$$

где λ_R – поверхностная плотность заряда цилиндра с радиусом R . В обоих случаях вектор напряженности электростатического поля \vec{E} будет направлен вдоль оси Or (рис.8).

Так как модуль напряженности электростатического поля для цилиндра является функцией только радиальной составляющей $E(r)$, то в соответствии с формулой (4), найдем разность потенциалов на бесконечно малом участке dr : $d\varphi = -E dr$.

Рассмотрим случай, когда заряд расположен только на *малом* цилиндре. Определим величину потенциала поля между цилиндрами в *области* $a < r_1 < R$, проинтегрировав выражение

$$d\varphi = -E dr: \varphi_M(r) - \varphi_a = - \int_a^{r_1} \frac{\lambda_a a}{\varepsilon_0 r} dr = \frac{\lambda_a a}{\varepsilon_0} \ln \frac{a}{r_1},$$

здесь φ_a – потенциал малого цилиндра. Таким образом, функция потенциала имеет следующий вид:

$$\varphi_M(r_1) = -b_M \ln r_1 + c_M, \quad (8)$$

где $b_M = \frac{\lambda_a a}{\varepsilon_0}$, $c_M = b_M \ln a + \varphi_a$.

Перейдем в *область за пределами* большого цилиндра, $r_2 > R$. Пусть заряд расположен только на *большом* цилиндре, тогда разность потенциалов между произвольной точкой снаружи и его поверхностью равна:

$$\varphi_6(r_2) - \varphi_R = - \int_R^{r_2} \frac{\lambda_R R}{\varepsilon_0 r} dr = \frac{\lambda_R R}{\varepsilon_0} \ln \frac{R}{r_2},$$

здесь φ_R – потенциал большого цилиндра. В этом случае, функция потенциала имеет общий вид:

$$\varphi_6(r_2) = -b_6 \ln r_2 + c_6, \quad (9)$$

где $b_6 = \frac{\lambda_R R}{\varepsilon_0}$, $c_6 = b_6 \ln R + \varphi_R$.

В случае, когда заряжены оба цилиндра, имеем принцип суперпозиции потенциалов:

$$\varphi(r) = - \int_a^r \frac{\lambda_a a}{\varepsilon_0 r} dr - \int_R^{r_2} \frac{\lambda_R R}{\varepsilon_0 r} dr + \varphi_a + \varphi_R = \frac{\lambda_a a}{\varepsilon_0} \ln \frac{a}{r} + \frac{\lambda_R R}{\varepsilon_0} \ln \frac{R}{r_2} + \varphi_a + \varphi_R.$$

В этом случае, функция результирующего потенциала имеет общий вид:

$$\varphi(r_2) = -b_M \ln r - b_6 \ln r_2 + c, \quad (10)$$

где $r > a$, $r_2 > R$, $c = c_M + c_6$.

Рассмотрим случай, когда коаксиальная система проводников не несет электрического заряда, но в координатной точке на удалении b от начала координат находится точечный заряд некоторой величины Q (рис. 9). В этом случае, носители заряда незаряженного проводника приходят в движение во внешнем электрическом поле. Они распределяются так, чтобы созданное ими электрическое поле было противоположно внешнему полю, то есть поле внутри проводника будет ослабляться. Перераспределение зарядов происходит до тех пор, пока не выполняются условия равновесия зарядов на проводнике.

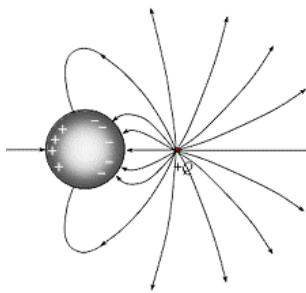


Рис.9

Электростатическая индукция – явление наведения собственного электростатического поля при действии на металлическое тело внешнего электрического поля. Явление обусловлено перераспределением зарядов внутри проводящих тел. Силовые линии внешнего электрического поля могут значительно исказиться вблизи тела с индуцированным электрическим полем. Нейтральный проводник, внесенный в электрическое поле, разрывает линии напряженности: они заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах и начинаются на положительных (рис. 9).

Если проводник *полый* (рис. 10), и внутри не размещены заряды, то электрическое поле внутри проводника отсутствует $E_{\Pi} = 0$, то есть внешний заряд не создает в

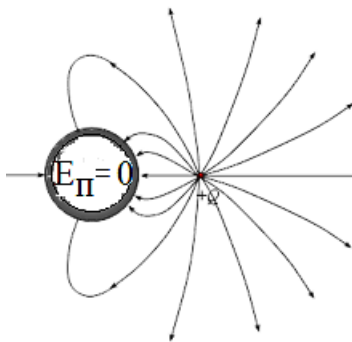
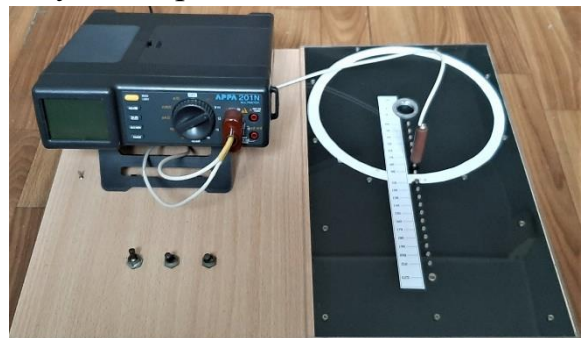
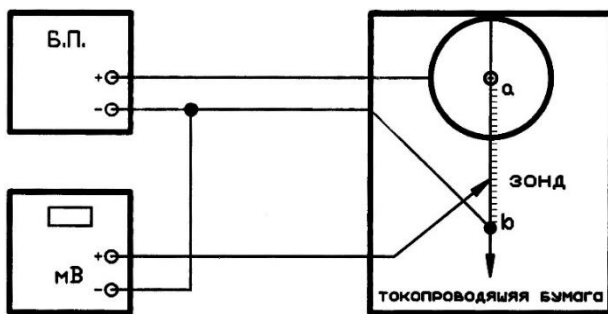


Рис.10

полости никакого электрического поля. На этом явлении основана *электростатическая защита*. Чтобы защитить какое-то тело, например, измерительные приборы, от влияния внешних электростатических полей их окружают проводящей оболочкой. При этом конфигурация поверхностных зарядов на этой оболочке такова, что их поле полностью уничтожает поле внешних источников внутри оболочки. Примером такой оболочки является коаксиальная система проводников (рис.7).

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка состоит из макета плоского электростатического поля, вольтметра, зонда и блока питания. Измерения потенциала точечных металлизированных контактов на слабо проводящей бумаге производятся зондом.



ЗАДАНИЕ

1. Подключить блок питания лабораторной установки и вольтметр к сети 220 В.
2. Перевести тумблер №1 на макете в положение «Вкл.» и произвести однозондовые измерения величины потенциала электрического поля заряженного малого цилиндра по оси r на макете. Перевести тумблер №1 на макете в положение «Выкл.».

Полученные данные внести в Таблицу1. Следуя указаниям ПРИЛОЖЕНИЯ1, построить средствами *MS Excel* график зависимости $\varphi_m(r_1)$. Сделать заключение о логарифмической зависимости величины потенциала от расстояния, сравнивая формулу линии тренда из эксперимента и формулу (8).

3. Перевести тумблер №2 на макете в положение «Вкл.» и произвести однозондовые измерения величины потенциала электрического поля заряженного большого цилиндра по оси r на макете. Перевести тумблер №2 на макете в положение «Выкл.»

Полученные данные внести в Таблицу1. Следуя указаниям ПРИЛОЖЕНИЯ1, построить средствами *MS Excel* график зависимости $\varphi_6(r_2)$. Сделать заключения 1) о логарифмической зависимости величины потенциала от расстояния, сравнивая формулу линии тренда из эксперимента и формулу (9); 2) о явление экранирования электростатического поля внутри большого цилиндра.

4. Перевести тумблер №3 на макете в положение «Вкл.» и произвести однозондовые измерения величины потенциала электрического поля заряженной коаксиальной системы проводников по оси r на макете. Перевести тумблер №3 на макете в положение «Выкл.»

Полученные данные внести в Таблицу1. Следуя указаниям ПРИЛОЖЕНИЯ1, построить средствами *MS Excel*

- 1) график зависимости $\varphi(r_1)$,
- 2) по функции линии тренда $\varphi_i = \varphi(r_{1,i})$ построить точечную диаграмму зависимости средних значений $E(r_i) = -\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{r_{1,i+1} - r_{1,i}}$ (см. формулу (4)).
- 3) по полученным значениям $E(r_i)$ построить линию тренда для величины напряженности $E(r)$ коаксиальной системы проводников. Сделать заключение о форме функции зависимости $E(r)$ от расстояния, сравнивая формулу линии тренда из эксперимента и формулу $E = \frac{\lambda_a a}{\varepsilon_0 r}$.
- 4) Отключить лабораторную установку от сети 220 В.

Таблица 1

№	r_1 , м	$\varphi_m(r_1)$, В	r_2 , м	$\varphi_6(r_2)$, В	$\varphi(r_1)$, В	$E(r_i)$, В/м
1.	0,01		0,01			
2.	0,02		0,02			
...	0,10		0,19			

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение основных характеристик электростатического поля.
2. Дать определение силовой линии. С какими характеристиками вектора напряженности \vec{E} она связана?
3. Дать определение эквипотенциальной поверхности. Как она количественно связана с потенциалом электрического поля φ ?
4. Доказать ортогональность эквипотенциальных поверхностей и линий напряженности.

5. Показать, что линейный интеграл $\int_L \vec{E} \cdot d\vec{l}$ не зависит от формы кривой, соединяющей две точки поля. Записать условие потенциальности поля.
6. Получить в общем виде связь между напряженностью \vec{E} и потенциалом φ .
7. Вывести выражение для модуля напряженности системы цилиндров (7).
8. Обосновать справедливость использования полей стационарных токов для исследования электростатических полей.
9. Объяснить физические основы электростатической защиты.
10. Пояснить принцип работы используемых макетов.

ЛИТЕРАТУРА

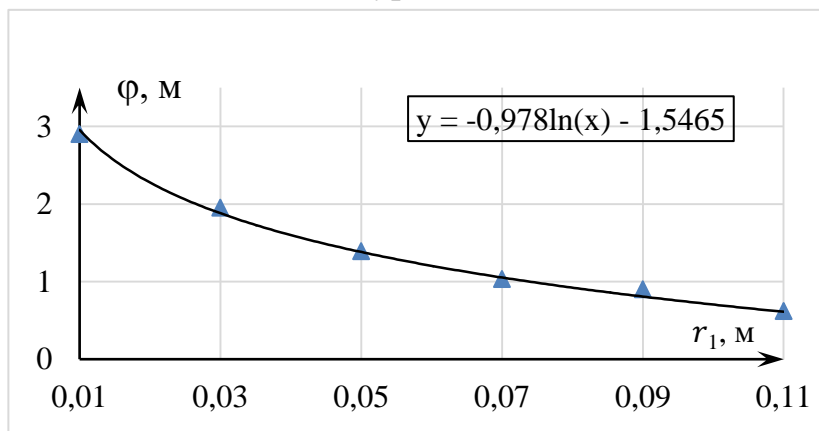
1. Курс общей физики : учебное пособие : в 5 книгах / И. В. Савельев. – Москва : АСТ : Астрель, 2008. – 5 кн.
2. Курс физики : учебное пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Высшая школа, 1989. – 607 с.
3. Физика : учебник / И. И. Наркевич, Э. И. Волмянский, С. И. Лобко. – Минск : Новое знание, 2004. – 680 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Воспользуемся процедурой построения графиков (диаграмм) в приложении *MS Excel* для п.2 Задания:

1. Ввести данные в виде столбцов для r_1 и $\varphi_m(r_1)$. Выделить курсором полученные столбцы. Внимание! Данные измерений даны в качестве *примера*.
2. Выбрать «Вставка точечной диаграммы».
3. Кликнуть по маркерам диаграммы и выбрать «добавить линию тренда». В открывшемся меню выбрать «логарифмическая» и «показать уравнение».

r_1 , м	φ , В
0,010	2,9
0,030	1,95
0,050	1,39
0,070	1,03
0,090	0,9
0,100	0,62



Результаты представлены на диаграмме *MS Excel* в виде множества дискретных маркеров. На этой же диаграмме построен график *логарифмической* линии тренда. Общий вид уравнения линии тренда дается уравнением:

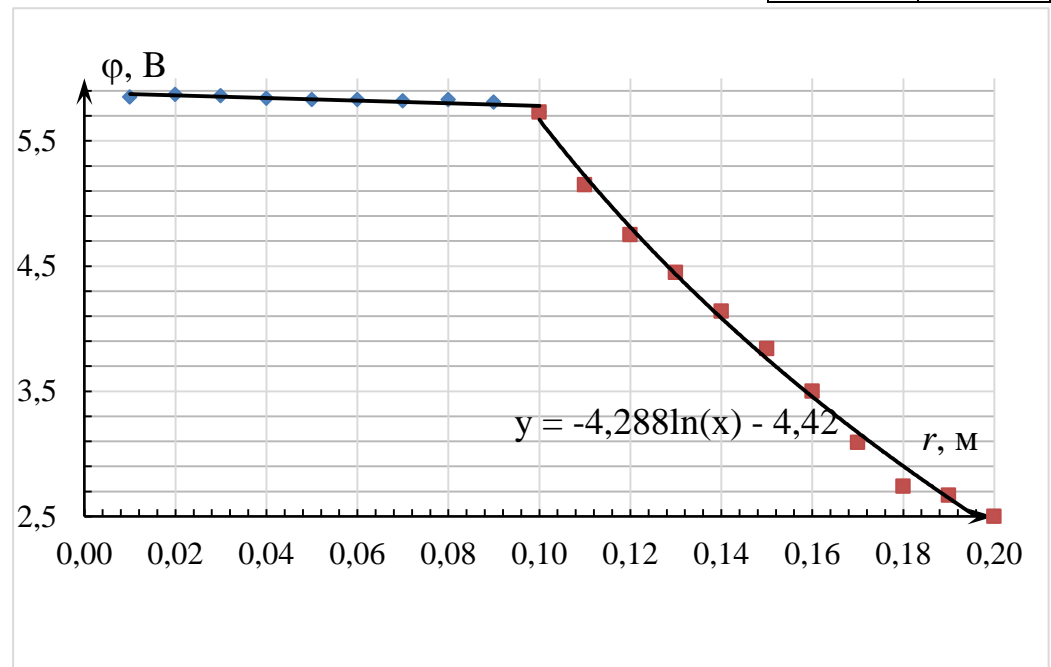
$$y = -0,978\ln(x) - 1,5465.$$

Для п.3 Задания:

1. Сначала для внутренней части большого цилиндра вести данные в виде столбцов для r_2 и $\varphi_6(r_2)$. Выделить курсором полученные столбцы. Внимание! Данные измерений даны в качестве *примера*.
2. Выбрать «Вставка точечной диаграммы». Кликнуть по маркерам диаграммы и выбрать «добавить линию тренда». В открывшемся меню выбрать «линейная».
3. Далее, для внутренней части большого цилиндра вести данные в виде столбцов для r_2 и $\varphi_6(r_2)$. Выделить курсором полученные столбцы. Внимание! Данные измерений даны в качестве *примера*.
4. Выбрать «Вставка точечной диаграммы». Кликнуть по маркерам диаграммы и выбрать «добавить линию тренда». В открывшемся меню выбрать «логарифмическая» и «показать уравнение».

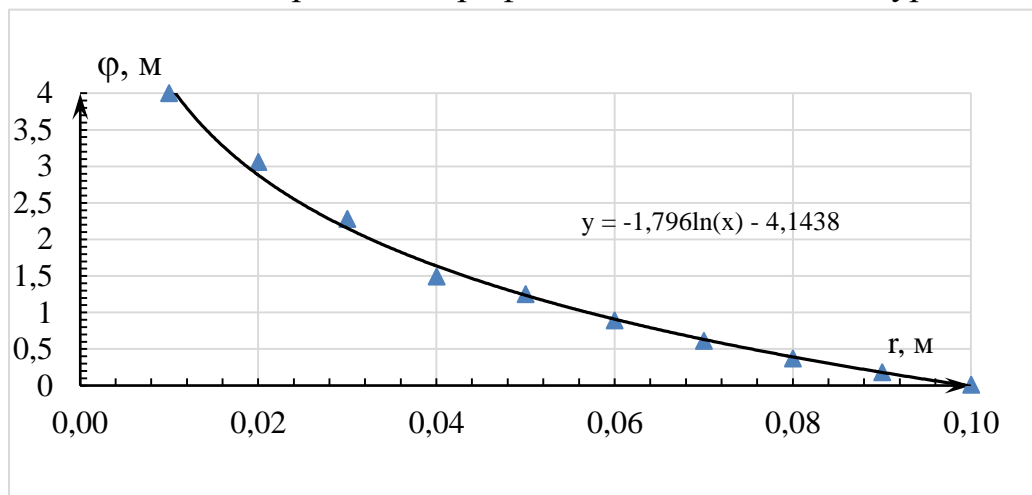
$r_2, \text{ м}$	$\varphi, \text{ В}$
0,100	5,73
0,110	5,15
0,120	4,75
0,130	4,45
0,140	4,14
0,150	3,84
0,160	3,5
0,170	3,09
0,180	2,74
0,190	2,67
0,200	2,5

$r_2, \text{ м};$	$\varphi, \text{ В}$
0,010	5,85
0,020	5,87
0,030	5,86
0,040	5,84
0,050	5,83
0,060	5,83
0,070	5,82
0,080	5,83
0,090	5,81
0,100	5,73



Для п.4 Задания:

1. Ввести данные в виде столбцов для r_1 и $\varphi(r_1)$. Выделить курсором полученные столбцы. Внимание! Данные измерений даны в качестве *примера*.
2. Выбрать «Вставка точечной диаграммы».
3. Кликнуть по маркерам диаграммы и выбрать «добавить линию тренда». В открывшемся меню выбрать «логарифмическая» и «показать уравнение».



4. Для построения диаграммы зависимости средних значений $E(r_i)$, введем столбец данных для r_i , а для функции линии тренда $\varphi(r_i)$ столбец – по формуле линии тренда: $y = -1,796\ln(x) - 4,1438$. Выделяем ячейку **C5**, в строке функций набираем указанную формулу, нажимаем *Enter* и получаем результат 4,1279 в ячейке **C5**. Выделяем эту ячейку курсором и «протягиваем» вниз, получаем столбец рассчитанных значений φ_i .

Далее, вводим формулу для расчета средних значений $E(r_i) = -\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{r_{1,i+1} - r_{1,i}}$,

начиная от ячейки **C5** для потенциала $\varphi_{i=1} = 4,1279$. Первое значение напряженности получается в ячейке **D5** – 124,57. Выделяем эту ячейку курсором и «протягиваем» вниз, получаем столбец рассчитанных значений $E(r_i)$.

Формула в строке функций: $f_x = -1,796 * \ln(B5) - 4,143$

ячейка B5

$r, \text{м}$	$\varphi_i, \text{В}$	$E_i, \text{В/м}$
0,010	4,1279	
0,020		
0,030		
0,040		
0,050		
0,060		
0,070		
0,080		
0,090		
0,100		

Формула в строке функций: $f_x = -1,796 * \ln(B5) - 4,143$

$r, \text{м}$	$\varphi_i, \text{В}$	$E_i, \text{В/м}$
0,010	4,1279	
0,020	2,883	
0,030	2,1548	
0,040	1,6381	
0,050	1,2373	
0,060	0,9099	
0,070	0,633	
0,080	0,3932	
0,090	0,1817	
0,100		

Формула в строке функций: $f_x = -(C6 - C5) / 0,01$

$r, \text{м}$	$\varphi_i, \text{В}$	$E_i, \text{В/м}$
0,010	4,1279	124,57
0,020	2,8822	
0,030	2,154	
0,040	1,6373	
0,050	1,2365	
0,060	0,9091	
0,070	0,6322	
0,080	0,3924	
0,090	0,1809	
0,100	0,011	

Выбрать «Вставка точечной диаграммы». Правой кнопкой кликнуть по диаграмме «Выбрать данные», последовательно выделяем данные в виде столбцов для r и $E(r_i)$. Кликнуть по маркерам диаграммы и выбрать «добавить линию тренда». В открывшемся меню выбрать «степенная» и «показать уравнение», получаем степенную функцию вида

$$y = 1,1633x^{-0,97} \approx 1,16x^{-1}, \text{ что совпадает с формой функции } E = \frac{\lambda_a a}{\varepsilon_0 r}.$$

