НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

ФЭЛ-8

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ.

Тула, 2007 г

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Цель работы: ознакомиться с основными характеристиками и способами описания электростатических полей, провести экспериментальное моделирование электростатических полей, создаваемых электродами методом электролитической ванны.

Обоснование метода.

Для электромагнитных полей уравнения Максвелла в дифференциальной форме имеют вид:

$$\begin{aligned} rot\vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ div\vec{D} &= \rho, \\ rot\vec{H} &= j + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ div\vec{B} &= 0, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\vec{E}, \vec{H}$ – напряженности электрического и магнитного поля,

$\vec{D}$ – вектор электрического смещения,

ρ – плотность заряда,

j – плотность тока.

Статические явления характеризуются постоянством величин во времени $\left(\frac{\partial}{\partial t} = 0\right)$ и отсутствием токов проводимости $(j = 0)$. При этих условиях уравнения (1) разделяются на две полностью независимых системы, в одну из которых входят величины, характеризующие электростатическое поле:

$$rot\vec{E} = 0, \; div\vec{D} = \rho, \qquad (2)$$

а в другую – магнитостатическое поле:

$$rot\vec{H} = 0, \; div\vec{B} = 0. \qquad (3)$$

Таким образом, электростатическое и магнитостатическое поле можно рассматривать независимо друг от друга. В этом и состоит характерная особенность статических полей. Электростатическое поле обусловлено

неподвижными электрическими зарядами, магнитостатическое поле – неподвижными постоянными магнитами. Электростатическое поле характеризуется силовой характеристикой – напряженностью $\vec{E}$ и энергетической характеристикой – потенциалом φ.

Метод электролитической ванны основан на использовании ионной проводимости электролитов. При условии равенства потенциалов электродов в вакууме и электролите можно показать, что при заполнении однородной проводящей средой пространства электрическое поле системы проводников не изменяется.

Закон Ома в дифференциальной форме для электролита записывается в виде:

$$\vec{j} = \sigma\vec{E} = -\sigma \mathrm{grad}\varphi\,, \tag{26}$$

где j – плотность тока, σ – электропроводность электролита, $\vec{E}$ – напряженность электрического поля, φ – потенциал.

Для установившегося в электролите тока:

$$\mathrm{div}\vec{j} = 0\,. \tag{27}$$

Подставляя в выражение (27) значение $\vec{j}$ из выражения (26), получаем:

$$\begin{gathered} \mathrm{div}\left(-\sigma \mathrm{grad}\varphi\right) \equiv -\sigma\Delta\varphi = 0 \\ \Delta\varphi = 0 \end{gathered} \tag{28}$$

Так как при наличии в электролите стационарных токов потенциал электрического поля удовлетворяет уравнению Лапласа и единственное решение этого уравнения определяется заданием потенциалов всех электродов, и потенциал электростатического поля тоже удовлетворяет уравнению Лапласа, то можем заключить; распределение потенциала, полученное в электролитической ванне, может быть непосредственно перенесено на случай интересующих нас полей проводников в вакууме.

Наглядно это можно объяснить следующим образом. Если токи стационарные, то распределение электрических зарядов в проводящей среде не меняется во времени, хотя и происходит движение зарядов. Это обусловлено тем, что в каждой точке проводника на место уходящих зарядов непрерывно поступают новые заряды в таком же количестве. Поэтому в случае постоянного тока движущиеся заряды создают такое же поле, что и неподвижные заряды той же концентрации. Следовательно, электрическое поле проводника с постоянным током будет потенциальным, как и поле неподвижных зарядов (электростатическое).

Таким образом, задача об определении электростатического поля между электродами в вакууме может быть заменена задачей об определении электростатического поля, возникающего при прохождении тока через электролит.

Основные характеристика поля.

Потенциальный характер поля заключается в том, что каждой точке поля можно сопоставить специальную скалярную функцию координат $\varphi(x,y)$, называемую потенциалом. Физический смысл потенциала прост – он численно равен потенциальной энергии единичного пробного заряда, помещенного в данную точку поля, т. е.:

$$\varphi(x,y)=\frac{U(x,y)}{q_0} \tag{29}$$

где q_0 – величина пробного заряда, $U(x,y)$ - его потенциальная энергия в точке с координатами *x, y*. Здесь мы ограничиваемся двумя координатами, так как в данной работе исследуется плоское поле на поверхности проводящего электролита (воды), но, естественно, что формула (29) применима и для пространственного случая.

Другая основная характеристика поля – напряженность электрического поля – физическая величина, численно равная силе, действующей на единичный пробный заряд, помещенный в данную точку поля:

$$\vec{E}(x,y)=\frac{\vec{F}(x,y)}{q_0} \tag{30}$$

Между $\vec{E}$ и φ существует взаимосвязь, вытекающая из определения этих величин:

$$\vec{E}=-grad\varphi \tag{31}$$

где вектор $grad\varphi$ называется градиентом потенциала. В двумерном случае:

$$grad\varphi=\vec{e}_x\frac{d\varphi}{dx}+\vec{e}_y\frac{d\varphi}{dy} \tag{32}$$

где $\vec{e}_x$ и $\vec{e}_y$ - единичные орты координатных осей.

Таким образом:

$$E_x=-\frac{\partial\varphi}{\partial x},\ E_y=-\frac{\partial\varphi}{\partial y} \tag{33}$$

Для наглядного графического изображения используют эквипотенциальные поверхности и силовые линии. Эквипотенциальные поверхности – поверхности равного потенциала, удовлетворяющие уравнению $\varphi(x,y,z)=const$, в рассматриваемом случае плоского поля это уже не поверхности, а линии, уравнение которых $\varphi(x,y)=const$.

Силовые линии – это геометрические линии, в каждой точке которых вектор $\vec{E}$ направлен по касательной.

Можно показать, что силовые линии и эквипотенциальные поверхности взаимно перпендикулярны, а также, что градиент потенциала направлен по нормали к эквипотенциальной поверхности и равен по модулю $d\varphi/dn$, где *dn*

– расстояние по нормали между двумя эквипотенциальными поверхностями, потенциал которых отличается на бесконечно малую $d\varphi$. Поэтому $\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dn}\vec{e_n}$. Таким образом, вектор $\vec{E}$ направлен по нормали к эквипотенциальной поверхности в сторону убывания потенциала. Модуль же вектора $\vec{E}$ будет равен:

$$\left|\vec{E}\right| = \frac{d\varphi}{dn} \tag{34}$$

Во всех практических приложениях вместо точной формулы (34) приходится использовать приближенное выражение (рис. 1):

$$\left|\vec{E}\right| \approx \frac{\Delta\varphi}{\Delta n} \tag{35}$$

Эта формула тем точнее, чем меньше Δn, а значит и $\Delta\varphi$.

В заключении можно отметить, что между проводником с током и электростатическим полем существует важное различие: электростатическое поле равно нулю внутри проводника, а поле проводника с током нет, так как заряды, его создающие, движутся.

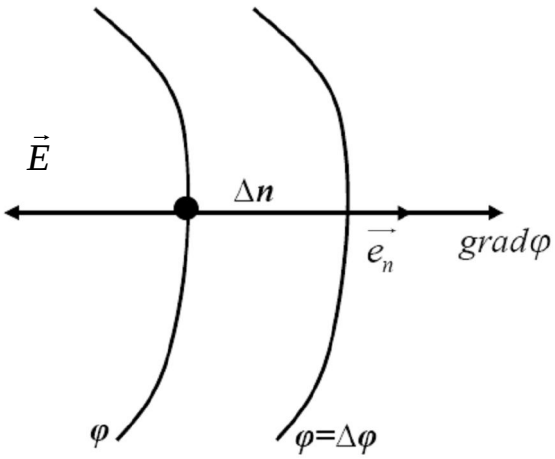
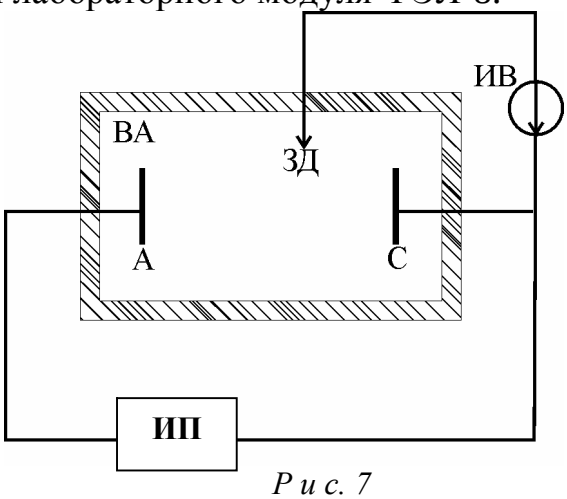


Рис. 1. К определению напряженности поля $\vec{E}$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальная установка представлена на рис. 2.

В плоский сосуд (ванну) *ВА* с координатной сеткой на дне устанавливаются электроды *А* и *С* (катод и анод). Затем дно сосуда заполняют водой (заполнение рассчитывают таким образом, чтобы вода равномерно покрывала все дно). Для измерения потенциала точки поля используется специально собранный цифровой вольтметр *ИВ* с высоким входным сопротивлением. Потенциал точки поля измеряется относительно потенциала катода (при этом $\varphi_к=0$ В). Постоянной напряжение величиной 5 В подается от специального стабилизированного источника питания ***ИП***, находящегося внутри лабораторного модуля ФЭЛ-8.



Р и с. 7

Зонд *ЗД* соединяется с измерительным вольтметром *ИВ*. Потенциал зонда равен потенциалу того места, где находится зонд. При касании зондом какой-либо точки граничной плоскости, вольтметр покажет потенциал этой точки относительно катода. Измеряя потенциалы различных точек, имеющих один и тот же потенциал, можно построить систему эквипотенциальных линий, затем изобразить совокупность силовых линий и при необходимости вычислить Е в любой точке поля по формуле (35).

Порядок выполнения.

1. Перерисовать на миллиметровую бумагу с установки электроды в натуральную величину, изобразив при этом координатные оси с делениями шкалы.
2. Определить потенциал анода φ_a, прикоснувшись к нему измерительным зондом. Проверить равенство нулю потенциала катода $\varphi_к$.
3. Выбрать эквипотенциальные линии, которые вы будете находить. Рекомендуется выбрать в качестве их линии, потенциалы которых равны φ_1=1,5 В; φ_2=1,7 В; φ_3=1,9 В и т. д. до максимально возможного значения ($\varphi_{i+1}= \varphi_i$ + 0.2 В).

4. Найти эквипотенциали в которых потенциал имеет значение φ_1. Для этого следует, поместив зонд в ванночку и плавно перемещая его параллельно координатной оси *y* **(**при этом координата *x* зонда равна какому-либо определенному значению, например *x=2*), наблюдать за показаниями цифрового вольтметра. В какой-то точке вольтметр покажет значение потенциала φ_1. Это и будет первая точка эквипотенциальной линии. Отметить эту точку на миллиметровой бумаге. **Измерительный вольтметр обеспечивает точные показания только при нахождении его в жидкости. При нахождении в воздухе на дисплее будут наблюдаться «шумовые» эффекты, связанные с работой АЦП вольтметра.**
5. Изменяя координату *x* зонда на 0,5 см и повторяя действия п.4, найти вторую, третью и последующие точки эквипотенциали со значением потенциала φ_1, отмечая эти точки на миллиметровой бумаге.
6. Соединив на своем рисунке точки с потенциалом φ_1 вы получаете первую из искомых эквипотенциалей.
7. Аналогичные измерения проделать для всех потенциалов φ_2, φ_3 и т. д.
8. Аккуратно, соблюдая взаимную ортогональность нарисовать на миллиметровой бумаге систему силовых линий (10-12 линий), указав стрелками их направление. Следует учитывать, что силовые линии начинаются и заканчиваются на электродах, а их густота пропорциональна величине электрического поля E
9. Вычислить по формуле (35) значения E во всех точках пересечения какой-либо одной силовой линии с эквипотенциалями.

Контрольные вопросы.

1. Что такое электрическое поле. Каковы его свойства?
2. Какие поля называются потенциальными? Как записать условие потенциального характера поля.
3. Что такое потенциал? Разность потенциалов? Каков их смысл?
4. Как определяется и какой смысл имеет электрический вектор Е? Как он связан с потенциалом?
5. Что собой представляет градиент потенциала? Чему равен его модуль, проекции? Куда он направлен?
6. Почему поле постоянного тока является потенциальным?
7. Чем отличаются электростатическое поле и поле постоянного тока?
8. Доказать, что силовые линии перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям.

Рекомендуемая литература.

1. Савельев И. В., Курс физики.
2. Иродов И. Е., Основные законы электромагнетизма: Учебное пособие
3. Калашников С. Г., Электричество.
4. Лабораторный практикум по физике (Под редакцией К. А. Барсукова и Ю. Н. Уханова).
5. Б. Ф. Алексеев, К. А. Барсуков «Лабораторный практикум по физике: Учебное пособие для студентов втузов», М., Высш. шк., 1988 г.
6. Гольдин Л. Л., Руководство к лабораторным занятием по физике.