

Лабораторная работа 3-1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ.

Цель работы: изучение электростатического поля.

Введение.

При конструировании электрических электронных ламп, конденсаторов, электронных линз часто требуется знать распределение электрического поля в пространстве, заключенном между электродами сложной формы. Аналитический расчет поля удается только при самых простых конфигурациях электродов и в общем случае невыполним. Сложные электростатические поля исследуются методом электролитической ванны. Измерения в электролитической ванне производят с помощью электродов, форма которых позволяет найти эквипотенциальные поверхности и по ним «построить» картину напряженности электрического поля. На них подают измененные в некотором отношении потенциалы. При этом между электродами возникает электрическое поле, отличающееся от исследуемого поля по напряженности и совпадающее по конфигурации. Пространство между электродами заполняется слабо проводящей жидкостью, которая не меняет распределение электрического поля. Выясним условия, необходимые для этого.

Распределение электрического поля в пространстве определяется дифференциальными уравнениями в частных производных, решения которых зависят от вида уравнения и от граничных условий. Так как полный заряд жидкости равен нулю, то плотность электрического тока \dot{j} внутри жидкости удовлетворяет уравнению непрерывности:

$$\operatorname{div} \dot{j} = 0 \quad (1)$$

Используя закон Ома в дифференциальной форме

$$\dot{j} = g \dot{E}, \quad (2)$$

где g - удельная электропроводность, а \dot{E} - напряженность электрического поля, из (1) и (2) получим:

$$\operatorname{div} \dot{E} = 0 \quad (3)$$

В отсутствии переменных во времени магнитных полей, кроме того

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{E}} = 0 \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) полностью определяют поведение поля в области между электродами (т.е. при заданных граничных условиях). Этим же уравнениям удовлетворяет и электрическое поле $\dot{\vec{E}}_0$ в отсутствие проводящей среды (и объемных зарядов).

Исследуем теперь граничные условия на электродах. В том случае, когда электропроводность среды мала и, следовательно, мал ток, протекающий через жидкость, вектор напряженности $\dot{\vec{E}}$ практически точно перпендикулярен к поверхности электродов, т.е. границы последних являются эквипотенциальными поверхностями. Т.к. сказанное имеет смысл в том случае, когда среда совсем не проводит тока, то граничные условия без слабо проводящей жидкости и в электролитической ванне на электродах совпадают.

Кроме условий на поверхности, на стенках и на дне сосуда возникают граничные условия.

Когда стенки сосуда и поверхность жидкости достаточно удалены от изучаемой области, то они не оказывают влияние на распределение электрического потенциала. При этом граничные условия в электролитической ванне полностью соответствуют граничным условиям на электродах в отсутствие жидкости, и распределения электрического поля в обоих случаях совпадают. Рассмотрим теперь случай, когда одна из поверхностей жидкости (например, верхняя) находится вблизи от исследуемого объема.

Граничные условия на поверхности жидкости и воздуха определяются тем, что электрический ток не может двигаться перпендикулярно к этой поверхности (из проводящей жидкости в непроводящий воздух). Т.к. плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля $\dot{\vec{E}}$, то в жидкости установится такое распределение потенциала, при котором вектор $\dot{\vec{E}}$ не имеет составляющих, перпендикулярных к поверхности.

В электролитической ванне, следовательно, можно без искажений моделировать только такие поля, которые не имеют составляющих, перпендикулярных к той плоскости, где будет проходить поверхность жидкости. Это же требование должно выпол-

няться на дне и стенках ванны, последние, впрочем, обычно находятся достаточно далеко от исследуемого объема, т.ч. их влияние можно не учитывать.

Как было выяснено, при определенных условиях распределение поля в электролитической ванне с достаточной точностью

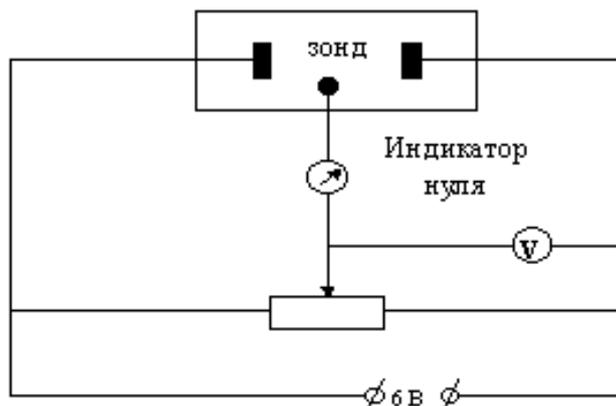


Рис.1. Принципиальная схема для моделирования полей в электролитической ванне.

воспроизводит распределение поля в непроводящей среде (в пустоте или в воздухе). В то же время измерение поля в проводящей среде существенно проще, чем в непроводящей. Обычно в электролитической ванне производится измерение не вектора напряженности поля, а электрических потенциалов. Для измерения в жидкости вводят зонды - тонкие металлические проволоки, соединенные с измерительной аппаратурой (рис. 1). Изменяя потенциал зонда, можно добиться того, чтобы протекающий через него ток стал равен нулю.

Потенциал зонда равен в этом случае потенциалу, который имелся в исследуемой точке до введения зонда. Введение в жидкость металлических проводников-зондов изменяет распределение поля в жидкости, т.к. вдоль зонда принудительно устанавливается одинаковый потенциал. Измерительные зонды поэтому не вызывают искажения лишь в случае, если они располагаются вдоль линий, которые до внесения зонда обладали одинаковыми потенциалами.

Особенно удобно исследовать с помощью зондов плоские поля, т.е. поля, не зависящие от какой-нибудь декартовой координаты, например z .

Зонд, расположенные параллельно оси z , заведомо не искажает в этом случае распределение электрического поля.

Небольшие искажения поля всегда происходят из-за того, что зонд не может быть сделан бесконечно тонким. Влияние толщины зонда зависит от соотношения между его диаметром и шири-

ной исследуемой области. Если диаметр зонда сравним с шириной области, то поле будет искажено. Обычно диаметр зонда делают значительно меньше ширины области, тогда искажения можно пренебречь.

ной области, на протяжении которой происходит существенное изменение потенциала электрического поля. Обычно искажения, связанные с размерами зонда, оказываются незначительными. Эти искажения особенно малы при измерениях с помощью моделей, изготовленных в сильно увеличенном масштабе.

Измерения в электролитической ванне лучше всего производить, используя для питания источники переменного тока, т.к. при работе с постоянным током происходит так называемая «поляризация» электродов, из-за которой ток через электролит все время уменьшается и изменяется распределение потенциалов. Проще всего проводить исследования с источником переменного тока низкой частоты. В качестве измерителя в этом случае должен применяться чувствительный прибор переменного тока. Заметив, что прибор служит при этом не для измерения величины тока, а только для его обнаружения, т.к. в момент измерения ток должен быть равен нулю. Прибор должен представлять собой чувствительный индикатор нуля.

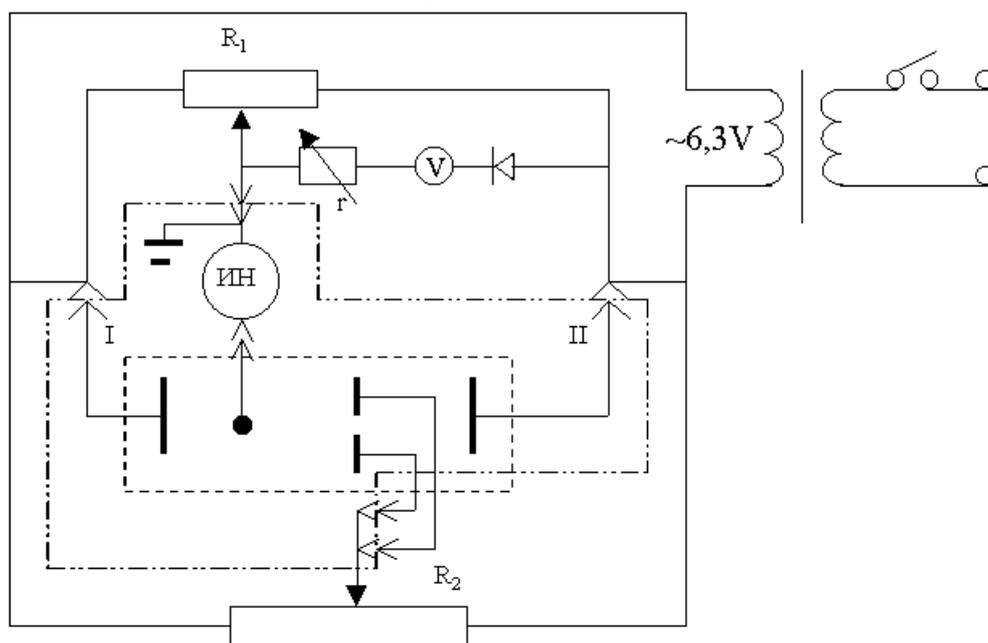


Рис.2 Схема установки для моделирования электростатических полей методом электролитической ванны. Блок элементов измерительного устройства.

ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: электролитическая ванна, набор электродов, индикатор нуля (осциллограф), вольтметр переменного тока и реостат, смонтированный на панели.

Исследование плоских полей

Порядок выполнения работы

Для исследования поля плоского конденсатора собрать схему согласно рис.2.

I, II – клеммы измерительного блока для подачи напряжения ~6,2 В на пластины электролитической ванны;

«сетка» - клеммы подачи напряжения на дополнительные пластины для моделирования электростатической линзы;

ИН – клемма подключения измерительного блока на нулевой провод (экран) входа индикатора нуля.

г- дополнительный калибровочный резистор для регулировки чувствительности вольтметра;

V – Вольтметр показывающий напряжение на плечах моста ИН – I и ИН – II, которые уравниваются в момент баланса моста.

В качестве электродов следует использовать медные пластины.

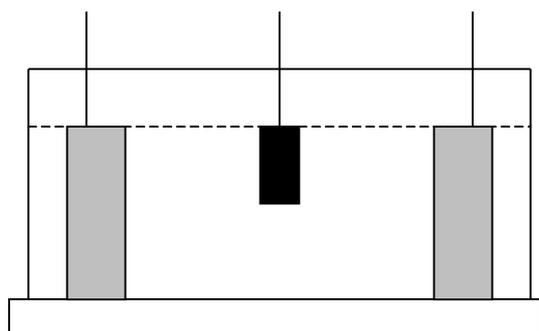


Рис.3. Схема погружения электродов в жидкость.

Необходимо следить за тем, чтобы дно ванны было горизонтальным, а электроды были расположены вертикально. Снизу электроды должны соприкасаться с дном, а сверху - несколько выступать над водой.

Измерительный зонд располагается в ванне вертикально. Погружать его можно на любую глубину, т.к. в плоском поле потенциал постоянен вдоль любой вертикальной линии.

Включить установку через трансформатор. Разомкнуть ключ и с помощью реостата установить стрелку прибора на нуль, затем замкнуть ключ. Если при этом между ползунком реохорда и зондом имеется напряжение, то стрелка гальванометра отклонится вправо или влево в зависимости от величины и знака разности потенциалов. Меняя положение зонда, нетрудно добиться того, что значение тока **через гальванометр** станет равным нулю. При этом потенциал зонда равен потенциалу ползунка реохорда, который легко определить, зная величину подводимого напряжения и отношения плеч реохорда. Затем следует найти положение эквипотенциальной поверхности, проходящей через

найденную точку, т.е. геометрическое место точек, потенциал которых равен потенциалу движка реохорда.

В нашем опыте, в качестве индикатора используется осциллограф. На экране осциллографа можно получить любой сигнал – систему синусоид, симметричные фигуры и т.п. Зонд присоединяется к одному из входов осциллографа. В момент, когда потенциал зонда станет равным потенциалу поля в данной точке, сигнал на осциллографе будет минимален. Рассмотрим такой пример. Напряжение между пластинами равно 6 В. Одна из них имеет потенциал равный нулю, другая – 6 В. Определить потенциалы пластин легко указанным выше способом. Для этого при помощи реостата R на вольтметре получают напряжение $U = 0$, и приводят зонд в соприкосновение с одной из пластин, затем с другой. В том случае, когда наблюдается минимум сигнала, потенциал равен нулю. Аналогично можно найти $U = 6$ В.

В работе требуется указанным выше способом исследовать распределение потенциала между электродами различной формы и на координатной сетке построить системы эквипотенциальных линий для каждой конфигурации электродов.

1. Убедиться, что между пластинами плоского конденсатора потенциал U_x линейно изменяется с расстоянием x , отсчитанным от одного из электродов.

$$U_x = (V / d) * x,$$

где V - напряжение между пластинами; d - расстояние между ними. Обратите внимание на искажение поля у краев пластин. Измерения проделать для разных расстояний между электродами. Объяснить ход эквипотенциальных линий на полученном рисунке 2.

Используя прежнюю установку, ввести между электродами две соединенные между собой пластины, как это показано на рисунке 4. Расстояние между пластинами должно быть существенно больше диаметра зонда, порядка 2- 4 см. Необходимо следить за тем, чтобы пластины доходили до дна ванны. Полученное устройство является моделью простейшей электрической линзы, которая используется для фокусировки электронных пучков. Исследовать распределение поля для случаев, когда потенциал средних пластин устанавливается выше и когда он выбирается

ниже того потенциала, который возникает в месте расположения средних пластин в их отсутствие.

2. Построить эквипотенциальные линии. Особое внимание следует обратить на искривление эквипотенциальных линий вблизи,

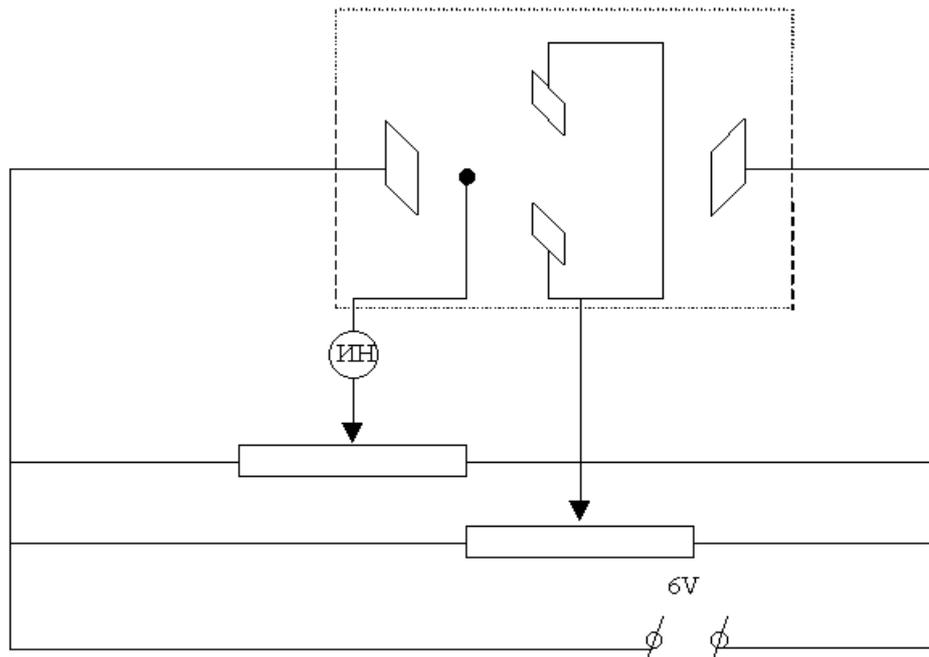


Рис. 4 Блок-схема установки для моделирования электрической

как такая система может фокусировать электроны.

Контрольные вопросы:

Какие поля называются электростатическими? Объясните смысл дифференциальных уравнений Максвелла: $Div(\vec{E}) = 0$ и $Rot(\vec{E}) = 0$.

Показать, что замена пространства между электродами слабо проводящей жидкостью при заданных граничных условиях не изменяет распределение электрического поля.

3. Дать определение напряженности электрического поля, потенциала электрического поля, разности потенциалов, эквипотенциальной поверхности.

4. Какие поля называются потенциальными (примеры).

5. Метод исследования полей с помощью зонда.

6. Показать, что для стационарных электрических полей $E = -grad(Y)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.Г.Калашников “Электричество”.- “Наука”1970.- §68, §69,
2. Л.Л.Гольдин “Руководство к лабораторным занятиям по физике”.
3. И.Е.Тамм “Основы теории электричества”.
4. И.Ф.Савельев. Курс общей физики т.п.- “Наука”,1973.- §11, 12, 25, 33.