

Лабораторная работа 8. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТОКОПРОВОДЯЩИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ МОСТА УИТСТОНА

Цели работы: ознакомление с методом измерения сопротивлений при помощи моста постоянного тока; приобретение навыков расчета сопротивления проводников переменного сечения; определение удельных сопротивлений материалов токопроводящих моделей.

Приборы и принадлежности: стенд для сборки измерительной цепи; токопроводящие модели; магазины образцовых сопротивлений; нуль-индикатор (гальванометр); источник тока.

Общие сведения

Сопротивление проводников зависит от их формы и размеров, от рода вещества и его состояния. Сопротивление проводника в форме цилиндра постоянного поперечного сечения

$$R = \rho l/S, \quad (8.1)$$

где l – длина проводника; S – площадь его поперечного сечения; ρ – удельное сопротивление материала проводника.

Удельное сопротивление служит одной из основных электрических характеристик вещества. Оно определяет плотность тока в веществе при заданной напряженности электрического поля (закон Ома в дифференциальной форме): $\mathbf{j} = \mathbf{E}/\rho$, а также удельную тепловую мощность тока, т. е. количество тепла, выделяющееся в единицу времени в единице объема (закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме):

$$dP/dV = E^2/\rho.$$

Зная ρ , можно рассчитать размеры проводника, требуемые для получения заданного его сопротивления, или наоборот – сопротивление при известных геометрических размерах проводника.

Выражение (8.1) имеет ограниченное применение: оно непригодно для проводников переменного сечения, в которых плотность тока не одинакова в любом сечении, например при расчете сопротивления утечки цилиндрического конденсатора, заполненного проводящей средой. Рассчитывают такие сопротивления, разбивая (руководствуясь соображениями симметрии) проводники (или проводящую среду) на множество элементов длиной dl с поперечным сечением S так, чтобы

плотность тока в любой точке отдельного элемента была одинаковой. Сопротивление каждого отдельного элемента

$$dR = \rho dl/S(l),$$

где S – площади поперечного сечения проводника, а сопротивление проводника на участке от точки 1 до точки 2 равно

$$R_{12} = \int_1^2 dR.$$

Если такое разбиение невозможно или зависимость $S(l)$ слишком сложна, используют подобие электрического поля в однородной проводящей среде с током электростатическому полю в диэлектрике при условии, что удельное сопротивление проводящей среды много больше удельного сопротивления материала электродов. Иначе говоря, распределение потенциала в проводящей среде с током окажется таким же, как и в диэлектрике (или вакууме), если, не меняя размеров и формы электродов, их взаимного расположения и разности потенциалов между ними, проводящую среду заменить диэлектрической. При этом выполняется соотношение

$$RC = \rho \epsilon \epsilon_0, \quad (8.2)$$

где R – сопротивление утечки между двумя электродами в проводящей среде с удельным сопротивлением ρ ; C – взаимная емкость электродов в среде с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ .

Таким образом, расчет сопротивления утечки между электродами в проводящей среде можно свести к расчету взаимной емкости двух проводников, т. е., по существу, к задаче электростатики.

Взаимная емкость электродов рассчитывается по формуле

$$C = Q/\Delta\varphi,$$

где Q – заряд на одном из электродов (на другом электроде имеется равный по модулю и противоположный по знаку заряд $-Q$); $\Delta\varphi$ – разность потенциалов между электродами.

Разность потенциалов находится криволинейным интегрированием электрического поля:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \int_1^2 \mathbf{E}d\mathbf{l} = - \int_1^2 E_l dl, \quad (8.3)$$

где E_l – касательная к пути интегрирования компонента вектора \mathbf{E} .

Путь интегрирования следует выбирать, руководствуясь соображениями простоты расчетов – например, при интегрировании вдоль силовой линии

электрического поля $E_l = E$. Электрическое поле находится либо как суперпозиция полей электродов, либо по формуле Гаусса (если задача обладает подходящей симметрией), либо другим, не столь простым способом (методом изображений, замены переменных и т. п.).

В результате расчета получится выражение для $\Delta\varphi$ в виде произведения Q на множитель, зависящий только от геометрии системы и диэлектрической проницаемости среды. Обратная этому множителю величина есть взаимная емкость этих электродов. Формула для расчета сопротивления утечки между электродами в проводящей среде получается из соотношения (8.2).

Следует также отметить, что из-за подобия распределения полей в проводящей среде и в диэлектрике проводящая среда с током может служить моделью для исследования электростатических полей. Например, вместо трудоемких расчетов или непосредственного измерения емкости какой-либо системы проводников сложной формы можно поместить модели этих проводников в проводящую среду, измерить сопротивление между ними, а затем найти емкость, используя соотношение (8.2). Во многих случаях такая методика оказывается предпочтительной.

Методика измерений

В данной работе измеряются сопротивления токопроводящих моделей, имитирующих реальные объекты, например изоляции коаксиального кабеля, утечки двухпроводной линии в проводящей среде, заземления и т. д. Измеренные значения R_x используются для расчета удельных сопротивлений материалов моделей ρ_x . При этом выводят формулу для сопротивлений конкретных моделей в предположении, что их удельные сопротивления и геометрические размеры известны. Затем, после преобразования формул к виду $\rho_x = f(R_x)$ и измерения необходимых геометрических размеров моделей, по измеренным значениям R_x находят ρ_x . Сопротивление в работе измеряется при помощи моста постоянного тока (моста Уитстона). Измерительный мост (рис. 8.1) образован четырьмя резисторами: сопротивления трех из них – R_1 , R_2 и R_3 – известны, сопротивление четвертого – R_x – требуется определить. Клеммами A и C мост присоединен к источнику G_1 , а в диагональ BD моста включен нуль-индикатор (гальванометр) P_1 .

Если сопротивления в плечах моста подобраны так, что напряжение U_{AC} делится между R_1 и R_x в ветви ABC в том же соотношении, что и между R_2 и R_3 в ветви ADC , то разность потенциалов между точками B и D равна нулю: тока через гальванометр нет и $R_x = R_1 R_3 / R_2$. Такой мост называется *сбалансированным*.

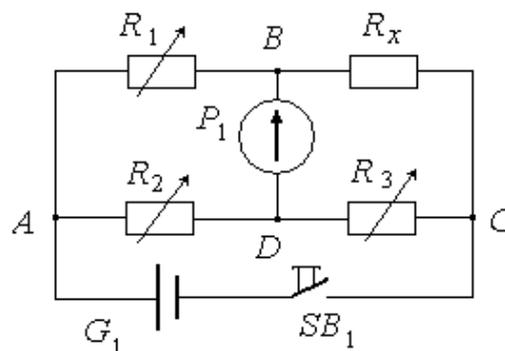


Рис. 8.1

В качестве резисторов R_1 , R_2 и R_3 используются многодекадные магазины образцовых резисторов, изменяя номиналы которых, добиваются баланса моста, а затем рассчитывают R_x . Измерения проводятся на двух моделях, имеющих сопротивления R_{x1} и R_{x2} . Переключатель SA_1 (на схеме не указан) обеспечивает включение в плечо моста резистора R_{x1} либо R_{x2} .

Указания по проведению наблюдений и обработке результатов

1. Собрать цепь измерительного моста, включить установку.
2. Установить отношение $R_1/R_2 = 1$ и подбором номинала резистора R_3 при кратковременном нажатии кнопки SB_1 добиться отсутствия тока через гальванометр. Провести несколько наблюдений при различных отношениях R_1/R_2 , указанных на панели установки, оценивая предварительно ожидаемые значения R_3 . Результаты занести в таблицу произвольной формы.
3. Повторить измерения п. 2 для второй модели.
4. Вывести формулы для сопротивлений R_{x1} и R_{x2} , преобразовать их к виду $\rho_x = f(R_x)$.

Выполнить эскизы моделей. Измерить и указать на эскизах геометрические размеры моделей, необходимые для расчета удельных сопротивлений материалов моделей. Выводы формул и эскизы включить в отчет.

5. Рассчитать средние значения и доверительные погрешности измеренных сопротивлений R_{x1} и R_{x2} и удельных сопротивлений материалов токопроводящих моделей ρ_{x1} и ρ_{x2} .

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните принцип мостового метода измерений.
2. Объясните принцип, лежащий в основе моделирования электростатических явлений на проводящих моделях.
3. Каковы основные преимущества мостового метода измерений?