Работа №

ИЗУЧЕНИЕ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА

Рассмотрим конденсатор, состоящий из двух одинаковых плоскопараллельных проводящих пластин достаточно больших размеров по сравнению с зазором между ними. Заземлим одну из пластин и сообщим другой пластине некоторый заряд q. Тогда на обращенной к зазору поверхности соседней пластины возникнет индуцированный заряд такой же величины, но противоположного знака. Зарядом конденсатора называется абсолютная величина равных по величине и противоположных по знаку зарядов каждой из пластин (обкладок) конденсатора.

Поле такого конденсатора сосредоточено между его обкладками и практически не зависит от расположения окружающих конденсатор внешних тел. Вектор напряженности поля $\mathbf{E}_0$ внутри конденсатора направлен от пластины, заряженной положительно, к пластине, несущей отрицательный заряд, а его модуль легко находится при помощи теоремы Гаусса:

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, \qquad (1)$$

где $\sigma = q/S$ - поверхностная плотность заряда (здесь S – площадь поверхности каждой из пластин, обращенной к другой пластине).

Под емкостью C конденсатора понимают отношение заряда конденсатора q к разности потенциалов $|\varphi_2 - \varphi_1|$ его обкладок:

$$C = \frac{q}{|\varphi_2 - \varphi_1|}. \qquad (2)$$

Потенциал однородного поля (а поле между пластинами практически однородно) убывает линейно вдоль направления вектора $\mathbf{E}_0$. Тогда разность потенциалов

$$|\varphi_2 - \varphi_1| = E_0 d, \qquad (3)$$

где d – зазор между пластинами конденсатора. Следовательно, из (1) – (3) получается, что емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}. \qquad (4)$$

До сих пор молчаливо предполагалось, что между обкладками конденсатора – вакуум. Теперь предположим, что пространство между обкладками заполнено однородным и изотропным диэлектриком. Тогда на поверхности диэлектрика, прилегающей к пластине с положительным зарядом, появится индуцированный связанный отрицательный заряд, а на противоположной поверхности диэлектрика – индуцированный связанный положительный заряд. Этот связанный заряд σ’ является источником электрического поля с напряженностью

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}, \qquad (5)$$

причем, как известно (см. [1]), $\sigma' = P_n$, где P_n – нормальная составляющая вектора поляризованности.

В результате, в силу принципа суперпозиции поле внутри диэлектрика окажется векторной суммой полей, создаваемых сторонним зарядом, находящимся на обкладках конденсатора, и поверхностным связанным зарядом:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}', \qquad (6)$$

причем векторы $\mathbf{E}_0$ и $\mathbf{E}'$ коллинеарны и направлены навстречу друг другу. Поэтому модуль вектора напряженности будет равен

$$E = E_0 - E' = E_0 - \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} \qquad (7)$$

Так как диэлектрик предполагается однородным и изотропным, то поляризованность диэлектрика пропорциональна напряженности поля:

$$\mathbf{P} = \kappa\varepsilon_0\mathbf{E} \qquad (8)$$

Поскольку диэлектрик полностью заполняет объем, ограниченный эквипотенциальными поверхностями поля сторонних зарядов, то вектор $\mathbf{E}$ на границе между проводящей обкладкой конденсатора и прилегающим к ней диэлектриком перпендикулярен границе, т.е.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_n \qquad (9)$$

Тогда, с учетом того, что $\sigma' = P_n$, из (7) – (9) получается

$$E = E_0 - \frac{\kappa\varepsilon_0 E}{\varepsilon_0} = E_0 - \kappa E\,, \tag{10}$$

откуда для напряженности поля внутри конденсатора имеем

$$E = \frac{E_0}{1+\kappa} = \frac{E_0}{\varepsilon}\,, \tag{11}$$

где ε - диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Поскольку при том же заряде напряженность поля в конденсаторе с диэлектриком уменьшилась в ε раз, то во столько же раз уменьшится и разность потенциалов между его обкладками. В результате емкость конденсатора возрастет в ε раз:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}\,. \tag{12}$$

Если диэлектрик перекрывает только часть зазора между пластинами, как показано на рис. 1, то емкость, очевидно, будет равна

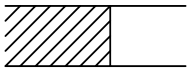

Рис. 1

$$C = \frac{\varepsilon_0 (S - S')}{d} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S'}{d}\,, \tag{13}$$

где S и S' – полная площадь поверхности обкладки и площадь, перекрытая диэлектриком, соответственно.

Для целей настоящей работы представим выражение (13) следующим образом:

$$C = \frac{S'}{d}\varepsilon_0(\varepsilon - 1) + \frac{S}{d}\varepsilon_0\,. \tag{14}$$

Для сравнения результатов экспериментов с теорией к правой части соотношений (12) и (14) следует добавить так называемую паразитную емкость $C_п$ обусловленную не строгостью предположения о том, что окружающие тела не влияют на поле между пластинами и тем, что подводящие провода и входные цепи измерительного прибора также обладают некоторой емкостью. Таким образом, для реального плоского конденсатора с диэлектриком измеряемая емкость равна

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} + C_n\,, \tag{15}$$

а для конденсатора с диэлектриком, перекрывающим только часть зазора между пластинами

$$C = \frac{S'}{d}\varepsilon_0(\varepsilon - 1) + \frac{S}{d}\varepsilon_0 + C_n\,. \tag{16}$$

Если заряженный конденсатор замкнуть на сопротивление R, то практически вся энергия, накопленная в конденсаторе, будет выделена на сопротивлении и тогда, в соответствии с законом Джоуля-Ленца,

$$W = \frac{1}{R}\int_0^\infty U^2(t)\,dt, \tag{17}$$

причем зависимость U от времени выражается (см. описание лабораторной работы №2), как

$$U(t) = U_0 e^{\frac{-t}{RC}}\,. \tag{18}$$

Подставляя (18) в (17) и вычисляя интеграл, получим известную формулу для энергии конденсатора:

$$W = \frac{1}{R}U_0^2\frac{RC}{2} = \frac{U_0^2 C}{2} \tag{19}$$

Для того, чтобы иметь возможность экспериментально определить энергию, запасенную в конденсаторе, возьмем интеграл от соотношения (18):

$$\Im = \int_0^\infty U(t)\,dt = U_0\int_0^\infty e^{\frac{-t}{RC}}dt = U_0 RC\,. \tag{20}$$

Как видно из сравнения выражений (19) и (20) для определения запасенной в конденсаторе энергии достаточно найти площадь под кривой $U(t)$ и домножить ее на $U_0/2R$:

$$W = \Im \cdot U_0/2R\,. \tag{21}$$

<u>Выполнение работы</u>

1. Определение паразитной емкости.

a) Измерить диаметр пластин конденсатора и вычислить их площадь.

b) Определить толщину листа бумаги, используемого в качестве диэлектрика (рекомендуется измерить толщину стопки листов и разделить на число листов в стопке).

c) Подключить пластины конденсатора к прибору, измеряющему емкость, и последовательно увеличивая толщину стопки листов, помещаемых между пластинами, снять зависимость емкости от расстояния между пластинами (провести не менее трех циклов измерений).

d) Нанести на график $C = C(1/d)$ измеренные экспериментальные точки. Провести через экспериментальные точки прямую и определить, согласно (15), паразитную емкость $C_п$, как ординату точки пересечения проведенной прямой с осью C.

2. Определение диэлектрической постоянной ε_0 и диэлектрической проницаемости бумаги.

a) Измерить емкость конденсатора при постоянном расстоянии между пластинами, используя изолирующие прокладки различной площади, (провести не менее трех циклов измерений).

b) Нанести на график $C = C(S')$ измеренные экспериментальные точки. Провести через экспериментальные точки прямую до ее пересечения с осью ординат и определить, согласно (16), диэлектрическую постоянную ε_0 с использованием уже известных геометрических размеров конденсатора и величины паразитной емкости.

c) Определить диэлектрическую постоянную бумаги из тангенса угла наклона прямой, построенной в п.1, с учетом полученного значения ε_0.

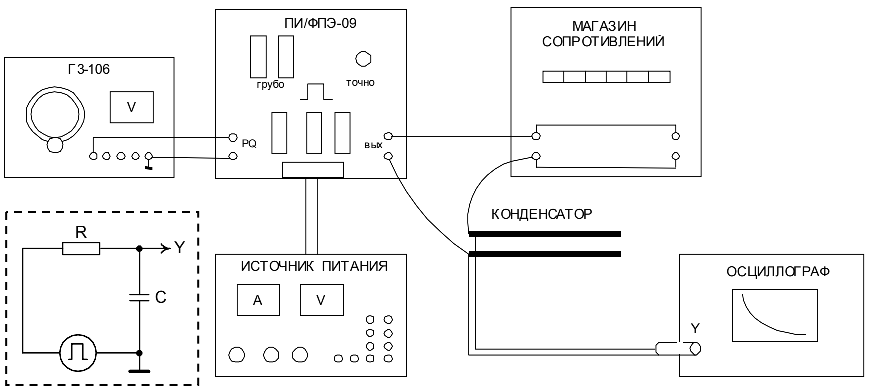

Рис.2

3. Определение энергии, запасенной в конденсаторе.

a) Собрать схему согласно рис.2., положив между пластинами конденсатора один лист бумаги.

b) Установить сопротивление R=100 кОм и получить на экране осциллографа устойчивое изображение кривой разряда конденсатора, занимающее максимально возможную часть экрана.

c) Определить площадь под кривой (см. рис. 3) и вычислить энергию, запасенную в конденсаторе, с использованием соотношения (21). При определении площади рекомендуется клетки, которые пересекаются кривой, подсчитывать попарно, подбирая их так, чтобы они дополняли друг друга до целой клетки.

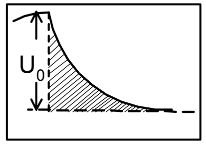

Рис. 3

d) Сравнить полученный результат с расчетом по формуле (19).

Литература

1. И.В.Савельев. Курс общей физики, т.2. Наука, М. 1988.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая емкость?
2. Каков физический смысл потенциала электростатического поля и разности потенциалов?
3. Как ориентированы линии напряженности поля относительно эквипотенциальных поверхностей?
4. Чему равен градиент потенциала электростатического поля в данном направлении?
5. Где начинается и кончается линия напряженности электростатического поля?
6. Для каких систем зарядов и как применяется теорема Гаусса при определении напряженности поля заданного распределения электрических зарядов? Получите формулу (1).
7. Какая существует связь между вектором поляризованности изотропного диэлектрика и вектором напряженности электростатического поля ?
8. Почему и как изменяется емкость конденсатора при введении диэлектрика в зазор между пластинами?