Горбатый Игорь Натанович
Доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Национального исследовательского университета МИЭТ.

Законы сохранения в задачах о конденсаторах

Рассмотрены типовые задачи о конденсаторах, решение которых основано на совместном использовании законов сохранения энергии и заряда. Задачи предлагаются с постепенным нарастанием их сложности. Статья, надеемся, будет полезна при подготовке к Единому государственному экзамену, а также к олимпиадам школьников. Систематизация задач по различным физическим сюжетам может представлять интерес и для учителей физики.

Задачи о конденсаторах часто встречаются на олимпиадах и экзаменах, они весьма разнообразны и традиционно трудны для многих абитуриентов. Журналы «Квант» и «Потенциал» неоднократно обращались к этой теме [1–7]. Но тема, на наш взгляд, не исчерпана: появляются новые задачи, а новые абитуриенты допускают старые ошибки.

Наиболее сложные и интересные задачи связаны с процессами перехода электрической цепи с конденсаторами из одного состояния в другое. Это может происходить из-за переключений в цепи или из-за механических воздействий, например, перемещения обкладок конденсатора или диэлектрика, расположенного между обкладками. Определение зависимости от времени зарядов, токов и напряжений в цепи во время таких процессов обычно требует решения дифференциальных уравнений, что весьма непросто, но некоторые величины, характеризующие начальное и конечное состояния, а также процесс в целом, могут быть найдены из законов сохранения энергии и заряда. В этом можно усмотреть аналогию с задачами о столкновениях в механике, когда законы сохранения импульса и энергии позволяют получить важные результаты, не рассматривая временные зависимости величин в процессе самого удара.

Далее будем рассматривать электрические цепи, состоящие из конденсаторов, резисторов и источников ЭДС. Чтобы сформулировать закон сохранения энергии применительно к этому случаю, рассмотрим некоторый процесс, в котором внешние силы совершили работу A, а источники ЭДС – работу $A_{\text{ист}}$. Пусть при этом энергия конденсаторов изменилась от W_1 до W_2, а на резисторах выделилось тепло Q. Тогда в соответствии с законом сохранения энергии

$$W_1 + A + A_{\text{ист}} = W_2 + Q. \qquad (1)$$

В формуле (1) не учтены изменение энергии магнитного поля, порождаемого токами, а также потери энергии за счёт излучения электромагнитных волн. Такое приближение хорошо работает, если индуктивность цепи мала и не рассматриваются очень быстрые изменения зарядов и токов.

Закон сохранения заряда означает, что для произвольной системы тел, ограниченных некоторой воображаемой замкнутой поверхностью, изменение суммарного заряда внутри этой поверхности за некоторое время равно заряду, который втекает в эту поверхность за то же время. В частности, если замкнутую поверхность (воображаемую границу системы) провести между обкладками нескольких конденсаторов, как показано на рис. 1, то суммарный заряд обкладок, оказавшихся внутри этой поверхности, во всех процессах остаётся неизменным ($q_1 + q_2 + q_3 = const$), поскольку через границу системы заряды пройти не могут.

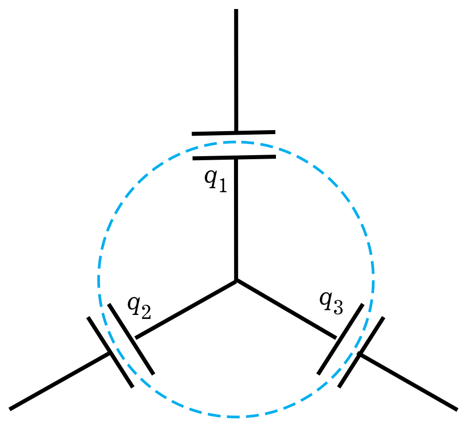

Рис. 1

Следующие примеры иллюстрируют основные сюжеты физических задач по рассматриваемой теме.

Соединяем заряженные конденсаторы

Задача 1. Конденсаторы ёмкостью $C_1 = 1$ мкФ и $C_2 = 2$ мкФ зарядили до напряжений $U_1 = 50$ В и $U_2 = 20$ В соответственно. Определите напряжение U на конденсаторах и их заряды Q_1, Q_2 после соединения конденсаторов: а) одноимённо заряженными обкладками, б) разноименно заряженными обкладками.

Решение. а) Нарисуем конденсаторы до соединения (рис. 2) и отобразим на рисунке наши намерения: мы планируем соединить конденсаторы одноименно заряженными обкладками. Изобразим также конденсаторы после соединения (рис. 3). Обозначим заряды обкладок конденсаторов до (q_1, q_2) и после (Q_1, Q_2) соединения, а также напряжения на конденсаторах. Учтем, что после соединения конденсаторов напряжения на них становятся одинаковыми.

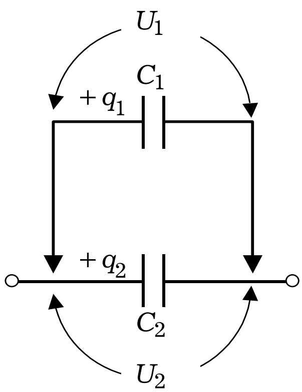

Рис. 2

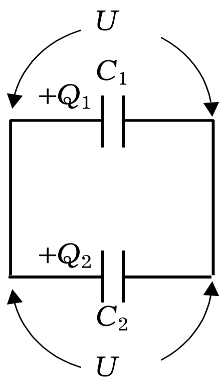

Рис. 3

Заряды Q_1 и Q_2 получились в результате перераспределения зарядов q_1 и q_2 между обкладками. По закону сохранения заряда

$$Q_1 + Q_2 = q_1 + q_2.$$

Учитывая, что $Q_1 = C_1U$, $Q_2 = C_2U$, $q_1 = C_1U_1$, $q_2 = C_2U_2$, после простых преобразований получим:

$$U = \frac{C_1U_1 + C_2U_2}{C_1 + C_2} = 30 \text{ В},$$

$$Q_1 = C_1U = 30 \text{ мкКл},$$

$$Q_2 = C_2U = 60 \text{ мкКл}.$$

б) На рис. 4 и 5 изображены конденсаторы до и после соединения. Теперь закон сохранения заряда имеет вид:

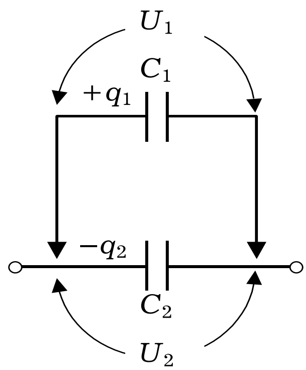

Рис. 4

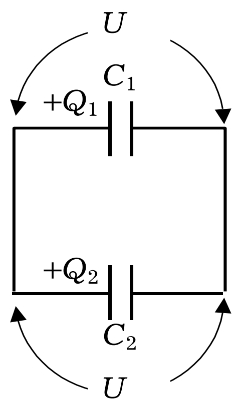

Рис. 5

$$Q_1 + Q_2 = q_1 - q_2.$$

Подставляя выражения для зарядов, после преобразований получим:

$$U = \frac{C_1U_1 - C_2U_2}{C_1 + C_2} \approx 3{,}3 \text{ В},$$

$$Q_1 = C_1U \approx 3{,}3 \text{ мкКл},$$

$$Q_2 = C_2U \approx 6{,}6 \text{ мкКл}.$$

Заметим, что заряды соединённых проводом обкладок (например, левых обкладок на рис. 5) обязательно имеют одинаковые знаки. В противном случае работа электрических сил в замкнутом контуре была бы отлична от нуля.

Полученные формулы нетрудно проверить экспериментально. Для этого нужно добыть пару конденсаторов ёмкостью в несколько тысяч микрофарад (в каждом кабинете физики найдутся такие), пару любых батареек, причём подойдут и «севшие», и электронный мультиметр – так называется прибор для измерения напряжений, токов и сопротивлений. Он недорогой, как калькулятор, и у некоторых мастеровитых людей есть дома. Важно, что вольтметр этого прибора имеет большое внутреннее сопротивление (несколько МОм), поэтому через него заряженный конденсатор разряжается медленно и можно успеть измерить напряжение, практически не разрядив конденсатор.

Задача 2. Незаряженные конденсаторы, ёмкости которых C и $2C$, соединили последовательно и подключили к источнику напряжения U. Определите напряжения U_1 и U_2, которые установятся на конденсаторах после того, как конденсатор ёмкостью $2C$ отключат от схемы, осторожно, не замыкая обкладок, перевернут на 180^o и вновь включат в цепь (рис. 6).

Решение. В начальном состоянии левые обкладки конденсаторов имеют заряд q, правые – заряд $-q$. Величина заряда

$$q = \frac{C \cdot 2C}{C + 2C} U = \frac{2}{3} CU .$$

Заряды левых обкладок конденсаторов после «переворота» второго конденсатора обозначим Q_1 и Q_2.

Заряды правых обкладок имеют противоположные знаки. Суммарный заряд правой обкладки конденсатора C и левой обкладки конденсатора $2C$ после переворота равен суммарному заряду правых обкладок конденсаторов C и $2C$ до переворота:

$$-Q_1 + Q_2 = -2q = -\frac{4}{3} CU .$$

Сумма напряжений на конденсаторах равна U:

$$\frac{Q_1}{C} + \frac{Q_2}{2C} = U.$$

Из этих уравнений найдём

$$Q_1 = \frac{10}{9} CU, \quad Q_2 = -\frac{2}{9} CU.$$

Для напряжений получим $U_1 = 10U / 9$, $U_2 = -U / 9$. Интересно, мы получили два «последовательно» включенных конденсатора, у которых заряды разные, а напряжение на одном из них превышает напряжение источника. А что получится, если повторить процедуру с переворотом конденсатора ещё раз? И ещё много-много раз? Чем всё закончится?

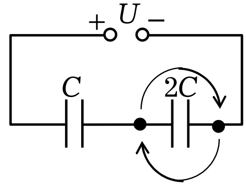

Рис. 6

Задача 3. Заряженный конденсатор подключают к такому же, но незаряженному конденсатору. Какая часть первоначально запасённой в конденсаторе энергии выделится в виде тепла через большой промежуток времени?

Решение. Начальную энергию конденсатора выразим через его заряд q и ёмкость C: $W_1 = q^2 / 2C$. Через достаточно большое время после подключения заряды на одинаковых конденсаторах станут равными. Из закона сохранения заряда следует, что $q_1 + q_2 = q$, поэтому $q_1 = q_2 = q / 2$. Энергия системы конденсаторов станет равной

$$W_2 = 2\frac{(q / 2)^2}{2C} = \frac{q^2}{4C}.$$

По закону сохранения энергии

$$Q = W_1 - W_2 = \frac{q^2}{4C} = \frac{W_1}{2}.$$

Итак, ровно половина первоначальной энергии выделится в виде тепла. Не правда ли, похоже на неупругое столкновение двух одинаковых шаров: и выделившееся тепло равно половине первоначальной энергии, и результат получается при помощи двух законов сохранения.

Задача 4. Заряженный конденсатор подключают к такому же, но незаряженному конденсатору (рис. 7). Какая часть первоначально запасённой в конденсаторе энергии выделится в виде тепла к моменту времени, когда напряжение на заряженном конденсаторе уменьшится на $\delta = 25\ \%$?

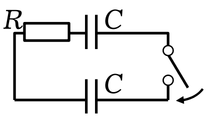

Рис. 7

Решение. Пусть q, U и W_1 – заряд конденсатора, напряжение на нём и энергия системы в начальный момент времени. Тогда $W_1 = q^2 / 2C$, $q = CU$. В момент времени, когда напряжение на заряженном конденсаторе уменьшится на 25%, заряды конденсаторов станут q_1 и q_2, причем

$$q_1 + q_2 = q,\ \ q_1 = CU\left(1 - \frac{\delta}{100\%}\right).$$

Энергия системы в этот момент

$$W_2 = \frac{q_1^2}{2C} + \frac{q_2^2}{2C},$$

количество выделившегося тепла в соответствии с формулой (1)

$$Q = W_1 - W_2.$$

Из этих уравнений получим

$$\frac{Q}{W_1} = \frac{2\delta}{100\%}\left(1 - \frac{\delta}{100\%}\right) = \frac{3}{8} = 0{,}375.$$

Заметим, что в рассматриваемый момент времени перезарядка конденсаторов ещё не завершена, через резистор протекает ток и именно поэтому напряжения на конденсаторах не одинаковые. Только по прошествии достаточно большого времени ток в цепи прекратится, заряды конденсаторов перестанут изменяться и напряжения на конденсаторах сравняются.

Изменяем ёмкость конденсатора, отключённого от источника напряжения

Задача 5. Плоский воздушный конденсатор ёмкостью C заряжен до напряжения U и отключён от источника. Какую работу A нужно совершить, чтобы увеличить расстояние между обкладками в $n = 2$ раза?

Решение. Заряд отключённого от источника конденсатора остаётся неизменным, поэтому ток не протекает и тепло не выделяется. Формула (1), выражающая закон сохранения энергии, принимает вид

$$W_1 + A = W_2,$$

где

$$W_1 = \frac{CU^2}{2} \text{ и } W_2 = \frac{C_2 U_2^2}{2}$$

– начальная и конечная энергии конденсатора, $C_2 = C / n$ – ёмкость после раздвижения обкладок, U_2 – конечное напряжение на конденсаторе. Поскольку заряд конденсатора неизменен,

$$CU = C_2 U_2.$$

После преобразований получим

$$W_2 = \frac{nCU^2}{2}.$$

Энергия конденсатора увеличилась за счёт работы, совершённой внешними силами при раздвижении обкладок конденсатора:

$$A = W_2 - W_1 = (n-1)\frac{CU^2}{2}.$$

Изменяем ёмкость конденсатора, подключённого к источнику напряжения

Задача 6. Плоский воздушный конденсатор ёмкостью C подключён к источнику постоянного напряжения U. Какую работу нужно совершить, чтобы медленно увеличить расстояние между обкладками в $n = 2$ раза, не отключая конденсатор от источника?

Решение. В данном случае напряжение U на конденсаторе остаётся постоянным, а ёмкость и заряд конденсатора уменьшаются. Через источник напряжения проходит заряд $\Delta q = q_2 - q_1$, где $q_1 = CU$ – начальный заряд конденсатора, $q_2 = C_2 U = CU / n$ – конечный заряд. Источник напряжения совершает работу

$$A_{\text{ист}} = \Delta q \cdot U = CU^2\left(\frac{1}{n} - 1\right).$$

Так как обкладки раздвигают очень медленно, ток в цепи оказывается малым, но протекает он длительное время. Можно ли пренебречь выделившимся теплом? По закону Джоуля – Ленца мощность выделения тепла $\Delta Q / \Delta t$ пропорциональна квадрату тока, а мощность источника $\Delta A_{\text{ист}} / \Delta t$ пропорциональна току в первой степени. Поэтому при очень медленном изменении ёмкости конденсатора выделением тепла можно пренебречь. Из закона сохранения энергии (1) следует:

$$A = W_2 - W_1 - A_{\text{ист}},$$

где начальная и конечная энергии конденсатора определяются формулами

$$W_1 = \frac{CU^2}{2}, \quad W_2 = \frac{C_2 U^2}{2} = \frac{CU^2}{2n}.$$

Отсюда найдём

$$A = \frac{CU^2}{2}\left(\frac{1}{n} - 1\right) - CU^2\left(\frac{1}{n} - 1\right) = $$

$$= \left(\frac{n-1}{n}\right)\frac{CU^2}{2}.$$

Работа оказалась в n раз меньше, чем в предыдущем случае, когда конденсатор был отключён от источника. Заметим, что в данном случае энергия конденсатора уменьшается, хотя внешние силы совершают положительную работу. На первый взгляд это кажется странным, но всё разъясняется, если учесть, что источник в данном процессе совершает отрицательную работу. Так, при $n = 2$ конечная энергия в 2 раза меньше начальной энергии W_1, работа источника отрицательна и равна $A_{\text{ист}} = -W_1$, а работа внешних сил по раздвижению обкладок равна половине начальной энергии:

$$A = W_2 - W_1 - A_{\text{ист}} =$$

$$= \frac{W_1}{2} - W_1 - (-W_1) = \frac{1}{2}W_1.$$

Задача 7. Плоский воздушный конденсатор емкостью C подключён к источнику постоянного напряжения U через резистор с большим сопротивлением. Какую работу нужно совершить, чтобы быстро увеличить расстояние между обкладками в $n = 2$ раза, не отключая конденсатор от источника? Изменением заряда конденсатора за время перемещения обкладок пренебречь.

Решение. Поскольку при быстром перемещении пластин конденсатора его заряд практически не изменился, работой источника и выделившимся в цепи теплом за это малое время можно пренебречь. Поэтому

$$W_1 + A = W_2,$$

где $W_1 = q^2 / 2C$ – начальная, а $W_2 = nq^2 / 2C$ – конечная энергии конденсатора, $q = CU$ – неизменный (во время быстрого процесса) заряд конденсатора. Из этих соотношений получим

$$A = (n-1)\frac{CU^2}{2}.$$

Ответ получился такой же, как в задаче 5. Однако в данном случае после быстрого изменения ёмкости равновесное состояние ещё не достигнуто. Напряжение на конденсаторе $U_2 = nq / C = nU$ сразу после резкого изменения ёмкости превышает напряжение источника. Это связано с тем, что в цепи протекает ток перезарядки и на резисторе падает некоторое напряжение. Далее этот ток будет уменьшаться, пока напряжение на конденсаторе не станет равным напряжению источника. Ток в цепи сопровождается изменением заряда конденсатора. Но об этом в следующей задаче.

Задача 8. Между обкладками плоского конденсатора, подключённого через резистор с большим сопротивлением к источнику напряжения U, находится диэлектрическая пластина с диэлектрической проницаемостью ε, полностью заполняющая пространство между обкладками. Какое количество теплоты Q выделится в электрической цепи после того, как пластину быстро извлекут из конденсатора? Ёмкость пустого конденсатора C. Изменением заряда конденсатора за время удаления из него пластины пренебречь.

Решение. Ёмкость конденсатора, с пластинкой между обкладками, равна εC, его заряд и энергия: $q_1 = \varepsilon CU$, $W_1 = \varepsilon CU^2 / 2$. Поскольку при быстром извлечении пластины из конденсатора, как и в задаче 7, его заряд практически не изменился, работой источника и выделившимся в цепи теплом за это малое время можно пренебречь. Поэтому $W_1 + A = W_2$, где $W_2 = q_1^2 / 2C$ – энергия конденсатора сразу после извлечения пластины, A – работа внешней силы. Через достаточно длительное время после удаления пластины перезарядка конденсатора прекратится, на конденсаторе установится напряжение U, его заряд и энергия станут соответственно равными: $q_3 = CU$, $W_3 = CU^2 / 2$. По закону сохранения энергии

$$W_2 + A_{\text{ист}} = W_3 + Q,$$

где $A_{\text{ист}} = (q_3 - q_1)U$ – работа источника напряжения, Q – количество выделившегося тепла. Из записанных выше уравнений получим

$$Q = \frac{CU^2}{2}(\varepsilon - 1)^2.$$

Конечно, такое же решение будет и в том случае, когда ёмкость конденсатора изменяют другим способом, например, перемещая обкладки, как в предыдущей задаче. Результат можно записать в виде $Q = CU^2(n-1)^2 / 2$, где n – отношение начальной ёмкости к конечной.

Заряжаем конденсатор от источника

Задача 9. Незаряженный конденсатор подключают к источнику ЭДС и дожидаются полной зарядки конденсатора. Энергия заряженного конденсатора становится равной W. Определите работу сторонних сил и количество выделившегося тепла в этом процессе.

Решение. Запишем закон сохранения энергии $A_{\text{ист}} = W + Q$, где $A_{\text{ист}} = \mathscr{E}q$ – работа источника, $\mathscr{E}$ – ЭДС источника, $q = C\mathscr{E}$ – конечный заряд конденсатора, $W = q^2 / 2C = C\mathscr{E}^2 / 2$ – накопленная энергия. Из этих соотношений следует, что $A = 2W$, $Q = W$, то есть половина работы источника идёт на зарядку конденсатора, а половина выделяется в виде тепла. Таким образом, приходится платить 100-процентный энергетический «налог» на зарядку конденсатора. Но оказывается, его можно уменьшить.

Задача 10. Незаряженный конденсатор подключают к батарейке с ЭДС $\mathscr{E} / 2$, дожидаются полной его зарядки, а затем «дозаряжают», подключив конденсатор к батарейке с ЭДС $\mathscr{E}$. Определите количество выделившегося тепла в этом процессе, если конечная энергия конденсатора равна W.

Решение. Воспользовавшись решением предыдущей задачи, найдём количество теплоты, выделившееся при зарядке до напряжения $\mathscr{E} / 2$:

$$Q_1 = \frac{C(\mathscr{E} / 2)^2}{2} = \frac{C\mathscr{E}^2}{8}.$$

При последующей зарядке конденсатора источник совершает работу

$$A_{\text{ист}} = \mathscr{E}(C\mathscr{E} - C\mathscr{E} / 2) = C\mathscr{E}^2 / 2,$$

энергия конденсатора увеличивается от $W_1 = C\mathscr{E}^2 / 8$ до $W_1 = C\mathscr{E}^2 / 2$. Следовательно, количество выделившегося тепла равно

$$Q_2 = A_{\text{ист}} + W_1 - W_2 = C\mathscr{E}^2 / 8.$$

Всего при зарядке выделилось теплоты

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{C\mathscr{E}^2}{4},$$

то есть в 2 раза меньше, чем при зарядке от одной батарейки. Ясно, что, если медленно наращивать ЭДС, обеспечивая достаточно малый ток зарядки в любой момент времени, то выделившееся тепло можно сделать сколь угодно малым. Правда, время зарядки будет очень большим. А если время ограничено? Как в этом случае следует заряжать конденсатор?

Задача 11. Конденсатор ёмкостью C подключён через резистор R к источнику напряжения с пренебрежимо малым сопротивлением и регулируемой величиной ЭДС. Конденсатор нужно зарядить до напряжения U за время T. По какому закону $\mathscr{E}(t)$ нужно изменять ЭДС источника, чтобы при зарядке в цепи выделилось минимальное количество теплоты Q? Чему равна величина Q?

Решение. Сначала предположим, что ток через источник изменяется «ступенькой»: в течение первой половины времени он равен постоянной величине i_1, а в течение второй половины времени – i_2. Тогда по условию задачи

$$q = CU = (i_1 + i_2)\frac{T}{2}.$$

Найдём значения i_1 и i_2, при которых величина

$$Q = (i_1^2 + i_2^2)R\frac{T}{2}$$

минимальна. Для этого из первого уравнения выразим $i_2 = (2q / T) - i_1$, подставим i_2 в выражение для Q и после простых преобразований получим

$$Q = RT\left[\left(i_1 - \frac{q}{T}\right)^2 + \left(\frac{q}{T}\right)^2\right].$$

Видно, что минимальное значение Q достигается при $i_1 = i_0 = q / T = CU / T$. При этом ток i_2 также равен i_0. Таким образом, количество выделившегося тепла минимально при постоянном токе. Минимальное количество теплоты равно

$$Q = Q_{\min} = RT\left(\frac{q}{T}\right)^2 = Ri_0^2T = $$
$$= \frac{CU^2}{2}\left(\frac{2RC}{T}\right).$$

Но это утверждение пока можно рассматривать лишь как гипотезу, поскольку мы искали минимум только среди «ступенчатых» функций. Рассмотрим теперь произвольную зависимость тока от времени $i = i(t)$. При этом

$$q = CU = \int_0^T idt, \quad Q = \int_0^T i^2Rdt.$$

(записанные здесь и ниже интегралы можно заменить соответствующими суммами, вычислять интегралы нам не придётся). Найдём разность

$$Q - Ri_0^2T = R\int_0^T\left(i^2 - i_0^2\right)dt.$$

Преобразуем подынтегральное выражение к виду

$$i^2 - i_0^2 = \left(i - i_0\right)^2 + 2i_0(i - i_0).$$

Учтём, что

$$\int_0^T idt = \int_0^T i_0dt = q.$$

Поэтому

$$Q - Ri_0^2T = R\int_0^T\left(i - i_0\right)^2 dt \geq 0.$$

Следовательно, при любом токе выделяемое тепло $Q \geq Ri_0^2T$.

Осталось найти зависимость ЭДС от времени:

$$\mathscr{E}(t) = i_0R + \frac{q(t)}{C} = i_0R + \frac{i_0t}{C} =$$
$$= U\left(\frac{RC + t}{T}\right).$$

Итак, сначала нужно резко увеличить ЭДС до величины $\mathscr{E}_0 = U\dfrac{RC}{T}$, которое может даже превышать величину U. Затем следует увеличивать ЭДС линейно до величины

$$\mathscr{E}(T) = U\left(\frac{RC}{T} + 1\right),$$

после чего нужно резко уменьшить ЭДС до величины U (или отключить конденсатор от источника).

Заметим, что существуют общие методы решения такого типа математических задач (они называются вариационными), в которых ищется подынтегральная функция, минимизирующая значение некоторого интеграла при выполнении определённых условий. Поступайте в хороший вуз и вас научат этим и многим другим могучим методам решения физических задач.

Задачи для самостоятельного решения

1. Незаряженные конденсаторы ёмкостью C и $2C$, источник напряжения U и ключ соединили в электрическую цепь, изображённую на рис. 8. Сначала ключ находится в положении 1. Определите напряжение U_1, которое установится на конденсаторе C после того, как ключ переведут в положение 2, а затем через некоторое время (достаточное для перезарядки конденсатора) вновь вернут в положение 1.

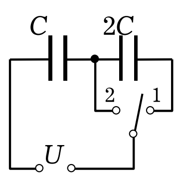

Рис. 8

2. Два плоских воздушных конденсатора ёмкостью $C = 15$ мкФ каждый, соединённые параллельно, заряжены до напряжения $U = 100$ В и отключены от источника. Определите работу A, которую необходимо совершить, чтобы медленно увеличить расстояние между пластинами одного из конденсаторов в $n = 2$ раза.

3. Внутри плоского конденсатора находится стеклянная пластина, толщина которой равна расстоянию между пластинами, а площадь вдвое меньше их площади. Конденсатор заряжают до напряжения $U = 400$ В и отключают от источника. Какую минимальную работу A нужно совершить, чтобы извлечь пластину из конденсатора? Ёмкость пустого конденсатора $C = 40$ пФ. Диэлектрическая проницаемость стекла $\varepsilon = 7$.

4. Внутри плоского конденсатора, подключённого к источнику напряжения $U = 400$ В, находится стеклянная пластина, полностью заполняющая пространство внутри конденсатора. Какую работу A против электрических сил нужно совершить, чтобы медленно извлечь пластину из конденсатора? Ёмкость пустого конденсатора равна $C = 40$ пФ.

5. Плоский воздушный конденсатор ёмкостью C подключён к источнику постоянного напряжения U. Расстояние между обкладками конденсатора увеличили в n раз. Какую работу совершили при этом внешние силы, если в цепи выделилось количество теплоты Q?

6. Заряженный конденсатор подключили к источнику напряжения с ЭДС $\mathscr{E} = 10$ В. После перезарядки конденсатора его энергия оказалась равной первоначальной, а в цепи за время перезарядки выделилось количество теплоты $Q = 0{,}4$ мДж. Определите ёмкость C конденсатора.

Ответы.

1. $U_1 = 7U/9$.
2. $A = \dfrac{n-1}{n+1} CU^2 = 0{,}05$ Дж.
3. $A = CU^2(\varepsilon^2 - 1)/8 \approx 38$ мкДж.
4. $A = CU^2(\varepsilon - 1)/2 = 19{,}2$ мкДж.
5. $A = \left(\dfrac{n-1}{n}\right)\dfrac{CU^2}{2} + Q$.
6. $C = Q/(2\mathscr{E}^2) = 2$ мкФ.

Литература

1. *Козел С.М.* Парадоксы плоского конденсатора. «Квант» 1985, №8.
2. *Можаев В.В.* Переходные процессы в электрических цепях. «Квант», 1990, №4.
3. *Чешев Ю.В.* Конденсаторы в электростатическом поле. «Квант», 2000, №4.
4. *Можаев В.В.* Конденсаторы в цепях постоянного тока. «Квант», 2000, №5.
5. *Можаев В.В.* Нестандартные конденсаторы. «Квант», 2004, №3.
6. *Можаев В.В.* Диэлектрик в плоском конденсаторе. «Потенциал», 2005, №11.
7. *Можаев В.В.* Переходные процессы в электрических цепях. «Потенциал», 2006, №5.