Позойский С.В., Жидкевич В.И. Избранные задачи по теме «Конденсаторные цепи» // Фізіка: праблемы выкладання. – 2006. – № 4. – С. 42-49.

Исправления Сакович А.Л. (ноябрь 2006)

Расчет электрических цепей, в которых конденсаторы соединены последовательно или параллельно, производится по известным формулам.

Если в цепи нет участков с последовательно или параллельно соединенными конденсаторами, но есть точки с одинаковыми потенциалами, то их можно либо соединять, либо разъединять, не меняя режима работы цепи. Цепь при этом упрощается, и мы приходим к случаю параллельно и последовательно соединенных конденсаторов.

Если в цепи нет параллельно и последовательно соединенных конденсаторов и нет точек с одинаковыми потенциалами, то для ее расчета используются следующие положения.

1. Сумма зарядов всех обкладок, соединенных с одним из полюсов источника тока, равна заряду источника (закон сохранения заряда):

$$\sum_{i=1} q_i = Q. \qquad (1)$$

Например, для цепи, изображенной на рисунке 1, $Q = q_1 + q_2 + q_3$.

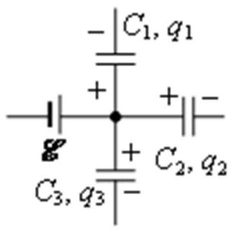



Рис. 1.

2. Если пластины нескольких конденсаторов соединены в один узел, не связанный непосредственно с источником тока, то алгебраическая сумма зарядов на этих пластинах равна нулю (закон сохранения заряда):

$$\sum_{i=1} q_i = 0. \qquad (2)$$

Например, для цепи, представленной на рисунке 2, $0 = -q_1 + q_2 + q_3$.

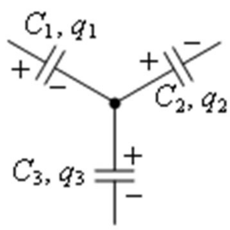



Рис. 2.

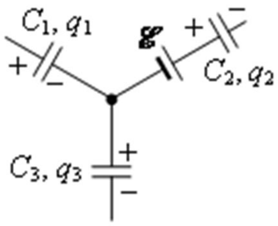



Рис. 3.

Это соотношение справедливо и тогда, когда перед конденсаторами имеются источники ЭДС (рис. 3): $0 = -q_1 + q_2 + q_3$.

3. Алгебраическая сумма разностей потенциалов на всех конденсаторах и источниках тока, встречающихся при обходе любого замкнутого контура, равна нулю (закон сохранения энергии):

$$\sum_{i=1} U_i = 0. \qquad (3)$$

4. Если на каком-либо из участков цепи *1–2* (рис. 4) имеется конденсатор и источник ЭДС, т.е. участок цепи неоднородный, то заряд конденсатора определяется ЭДС источника и разностью потенциалов на концах участка $U = \varphi_1 - \varphi_2$:

$$q = C \cdot (\mathcal{E} + \varphi_1 - \varphi_2) = C \cdot (\mathcal{E} + U). \qquad (4)$$

Если источника ЭДС на участке нет $(\mathcal{E} = 0)$, то

$$q = C \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = C \cdot U. \qquad (5)$$

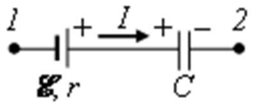



Рис. 4.

Этот факт обусловливает необходимость учитывать выбор знаков в каждом конкретном случае:

а) Если $\varphi_1 > \varphi_2$, т.е. разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ направлена в ту же сторону, что и ЭДС (см. рис. 4), то следует пользоваться формулой (4).

б) Если $\varphi_1 < \varphi_2$, то формулу (4) лучше записать в таком виде:

$$q = C \cdot (\mathcal{E} - (\varphi_2 - \varphi_1)) = C \cdot (\mathcal{E} - U), \qquad (6)$$

где $\varphi_2 - \varphi_1 = U$.

В этом случае разность потенциалов «противодействует» ЭДС. Если же при этом $\varphi_2 - \varphi_1 > \mathcal{E}$, то для определения заряда формулу (4) следует записать в таком виде:

$$q = C \cdot (\varphi_2 - \varphi_1 - \mathscr{E}) = C \cdot (U - \mathscr{E}). \qquad (7)$$

*Правило для определения знаков зарядов на обкладках конденсатора*: поле между обкладками конденсатора направлено в ту сторону, в которую направлена сумма ЭДС и разности потенциалов $\mathscr{E} + \varphi_1 - \varphi_2$.

В приведенном примере (см. рис. 4) при $\varphi_1 < \varphi_2$ и $\varphi_2 - \varphi_1 > \mathscr{E}$ поле конденсатора направлено влево (левая обкладка заряжена отрицательно, правая – положительно);

Если $\mathscr{E} = 0$, то поле между обкладками конденсатора направлено в сторону меньшего потенциала, т.е. со стороны меньшего потенциала будет обкладка с отрицательным зарядом.

в) В случае, когда величина потенциалов $\varphi_1$ и $\varphi_2$ неизвестна, следует пользоваться одним из рассмотренных вариантов по своему усмотрению.

Если несколько источников ЭДС и конденсаторов соединены последовательно, то заряд конденсатора определяется из соотношения

$$q = C \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} \mathscr{E} + (\varphi_1 - \varphi_2)\right), \qquad (8)$$

где $\sum_{i=1}^{n} \mathscr{E}$ – алгебраическая сумма ЭДС, *C* – общая емкость конденсаторов.

$$\frac{1}{C} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{C_k}. \qquad (9)$$

Правила знаков те же, что и приведенные ранее.

*Задача 1*. Конденсаторы соединены так, как показано на рисунке 5. Чему равна емкость всей батареи, если емкость каждого конденсатора равна *C*?

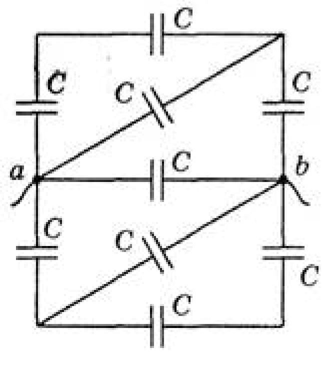
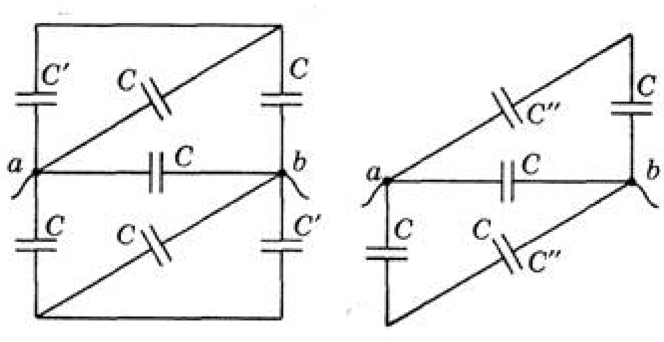
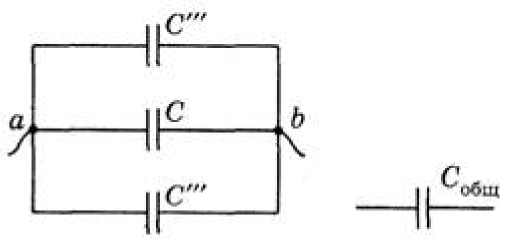



Рис. 5.

*Решение*. Упростим последовательно цепь (рис. 6).




а б




в г

Рис. 6.

$$C' = \frac{C}{2},\ C'' = C' + C = \frac{3}{2}C,\ C''' = \frac{C''\cdot C}{C''+C} = \frac{3}{5}C,$$

$$C_{\text{общ}} = 2C''' + C = \frac{11}{5}C.$$

*Задача 2*. Из проволоки сделан куб, в каждое ребро которого включено по одному конденсатору емкостью *C*. Найдите емкость батареи (рис. 7).

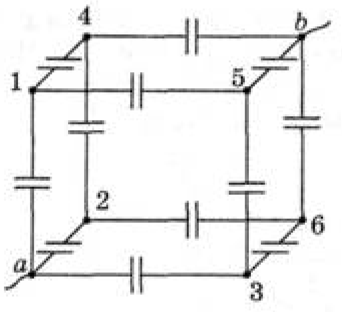
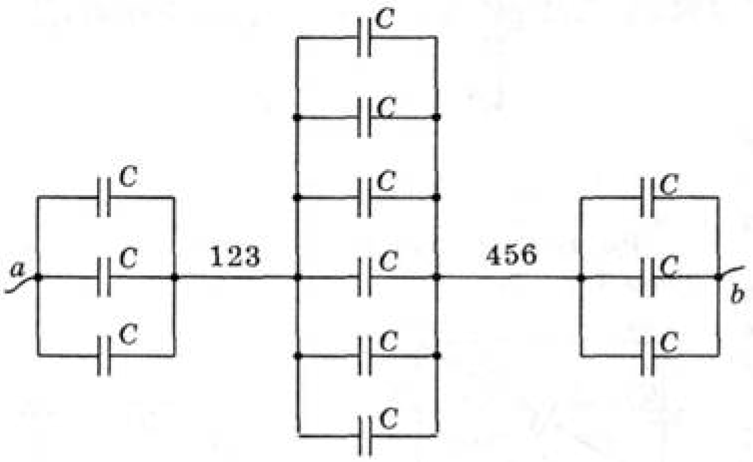



Рис. 7.

*Решение*. Соединяем точки с одинаковыми потенциалами *1*, *2*, *3* $(\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3)$ и *4*, *5*, *6* $(\varphi_4 = \varphi_5 = \varphi_6)$. Получим (рис. 8):




а


б

Рис. 8.

$$C' = 3C,\ C'' = 6C',\ C''' = 3C,$$

$$\frac{1}{C_{общ}} = \frac{1}{C'} + \frac{1}{C''} + \frac{1}{C'''} = \frac{1}{3C} + \frac{1}{6C} + \frac{1}{3C} = \frac{5}{6C},\ C_{общ} = 1,2C.$$

Предлагаем читателю самостоятельно рассмотреть случаи, когда цепь присоединена к источнику тока точками *а3* и *а6*.

*Задача 3.* В цепи, изображенной на рисунке 9, $C_1 = C_3 = C$; $C_2 = C_4 = C_5 = 2C$. Найдите емкость батареи конденсаторов.

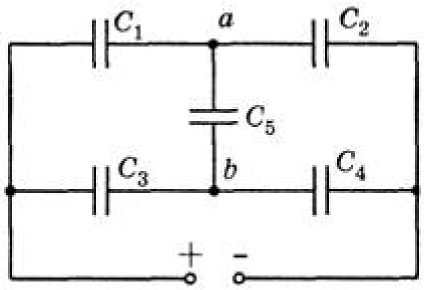
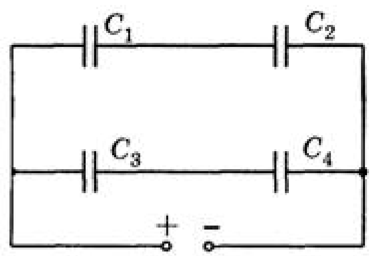



Рис. 9.

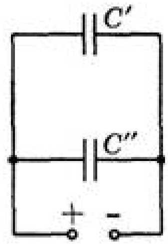
*Решение.* а) Из условия следует, что $\varphi_a = \varphi_b$, поэтому *к*онденсатор $C_5$ можно «выбросить» (рис. 10, а). Получим:

$$C' = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{C \cdot 2C}{C + 2C} = \frac{2C}{3},\ C'' = \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4} = \frac{C \cdot 2C}{C + 2C} = \frac{2C}{3},$$

$$C_{общ} = C' + C'' = \frac{2C}{3} + \frac{2C}{3} = \frac{4C}{3}.$$




а



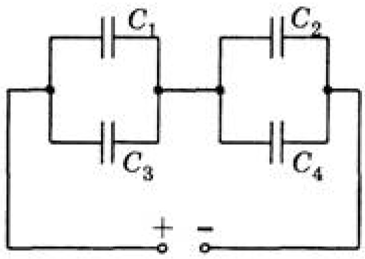

б

Рис. 10.

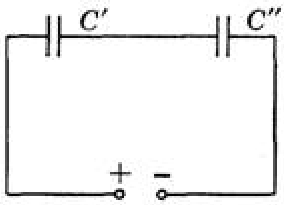
б) Но точки с одинаковыми потенциалами можно также соединить (рис. 11):

$$C' = C_1 + C_3 = C + C = 2C,\ C'' = C_2 + C_4 = 2C + 2C = 4C,$$

$$C_{общ} = \frac{C' \cdot C''}{C' + C''} = \frac{2C \cdot 4C}{2C + 4C} = \frac{8C}{6} = \frac{4C}{3}.$$




а




б

Рис. 11.

*Задача 4*. Определите заряд батареи конденсаторов, изображенной на рисунке 12, если к клеммам *AB* приложено напряжение $U$= 100 В, а емкости конденсаторов $C_1$ = 2 мкФ, $C_2$ = 1 мкФ.

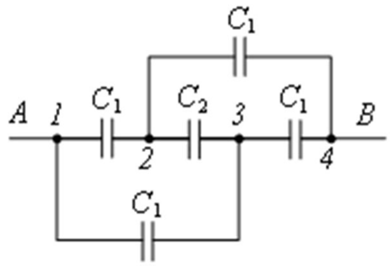
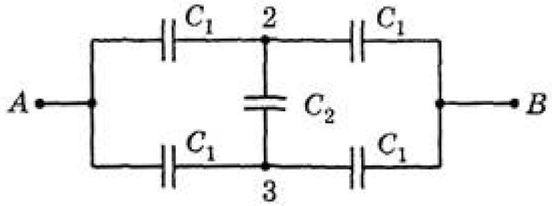
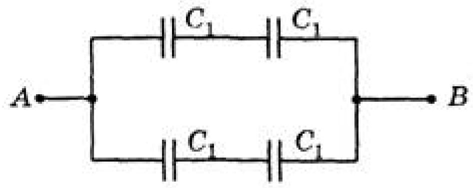



Рис. 12.

*Решение*. Заменим эту схему эквивалентной (рис. 13, а):




а




б

Рис. 13.

Мы видим, что эта задача аналогична задаче 3. И в этой цепи $\varphi_2 = \varphi_3$ и конденсатор $C_2$ можно «выбросить». Тогда получим цепь (рис. 13, б). Общая емкость этой батареи $C_{общ} = \frac{C_1}{2} + \frac{C_1}{2} = C_1$.

Находим заряд батареи: $q = U \cdot C_{общ} = U \cdot C_1$, $q = 2 \cdot 10^{-4}$ Кл.
Точки *2*, *3* можно было и соединить, как в задаче 3. Получили бы тот же результат.

*Задача 5*. Найдите емкость батареи одинаковых конденсаторов (рис. 14). Емкость отдельного конденсатора *C* считать известной.

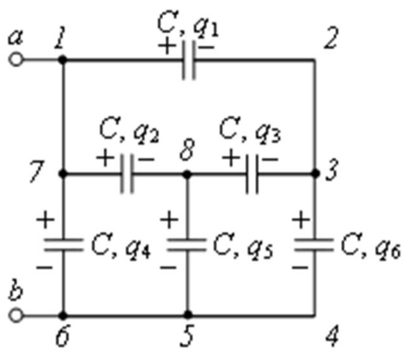



Рис. 14.

*Решение*. Общая емкость батареи

$$C_{общ} = \frac{q}{U}, \quad (1)$$

где $q$ – заряд батареи, $U$ – напряжение на ней.

Запишем уравнения для контуров и узлов. Контуры обходим против часовой стрелки. Если при этом мы идем от «–» к «+» на обкладках конденсатора, то соответствующая разность потенциалов берется со знаком «+», если от «+» к «–», то со знаком «–». Выбор направления обхода контура условен: его можно обходить и по часовой стрелке.

Контур *217832*:

$$\frac{q_1}{C} - \frac{q_2}{C} - \frac{q_3}{C} = 0. \quad (2)$$

Контур *87658*:

$$\frac{q_2}{C} - \frac{q_4}{C} + \frac{q_5}{C} = 0. \quad (3)$$

Контур *38543*:

$$\frac{q_3}{C} - \frac{q_5}{C} + \frac{q_6}{C} = 0. \quad (4)$$

Для узла *8*:

$$q_3 - q_2 + q_5 = 0. \quad (5)$$

Для узла *3*:

$$q_6 - q_3 - q_1 = 0, \quad (6)$$

$$U = \frac{q_4}{C}, \quad (7)$$

$$q = q_1 + q_2 + q_4, \quad (8)$$

$$q = q_4 + q_5 + q_6. \quad (9)$$

Решая эту систему уравнений, получим

$$q_1 = q_2 = q_5 = q_6 = \frac{q_4}{2}; \; q_3 = 0.$$

Следовательно, $C_{общ} = 2C$.

Эту же задачу можно решить иначе.

Пусть $\varphi_3 = \varphi_6 = \varphi_5 = \varphi_4 = 0; \; \varphi_2 = \varphi_1 = \varphi_7 = U$.

Потенциалы точек *8* и *3* – $\varphi_8,\ \varphi_3$ .

Для определенности будем считать, что $U \ge \varphi_8 \ge \varphi_3 \ge 0$ . Тогда

$$q_1 = C\cdot(U-\varphi_3),\ \ q_2 = C\cdot(U-\varphi_8),$$
$$q_3 = C\cdot(\varphi_8-\varphi_3),\ \ q_4 = C\cdot U,$$
$$q_5 = C\cdot\varphi_8,\ q_6 = C\cdot\varphi_3.$$

Кроме того, так как $q_2 = q_3 + q_5,\ q_6 = q_3 + q_1$ , то

$$C\cdot(U-\varphi_8) = C\cdot(\varphi_8-\varphi_3) + C\cdot\varphi_8, \tag{10}$$

$$C\cdot(U-\varphi_3) + C\cdot(\varphi_8-\varphi_3) = C\cdot\varphi_3. \tag{11}$$

Из этой системы получим

$$\varphi_8 = \varphi_3 = \frac{U}{2}.$$

Заряд батареи

$$q = q_4 + q_5 + q_6 = C\cdot U + C\cdot\frac{U}{2} + C\cdot\frac{U}{2} = 2C\cdot U,$$
$$C_{общ} = \frac{2C\cdot U}{U} = 2C.$$

*Задача 6.* Батарея конденсаторов заряжена до разности потенциалов $U_0$ = 200 В, после чего ее отключили от источника напряжения (рис. 15). Как изменится при этом энергия батареи при замыкании ключа *К*, если $C_1 = C_2 = C_3 = C_5$ = 1 мкФ; $C_4$ = 0,5 мкФ?

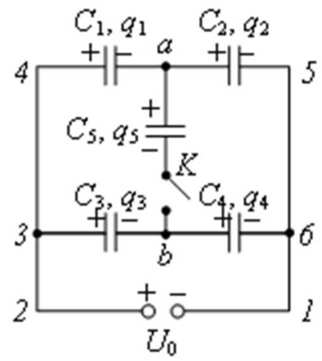



Рис. 15.

*Решение*. При отключении батареи от источника тока ее заряд не изменится независимо от положения ключа *К*, а емкость ее после замыкания ключа изменится. Пусть $C_0$, $C$ – емкости батареи до замыкания и после замыкания соответственно, $W_0$, $W$ – соответствующие энергии, $q_0 = q$ – заряд батареи.

$$\Delta W = W - W_0 = \frac{q^2}{2C} - \frac{q^2}{2C_0} = \frac{q^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0}\right), \qquad (1)$$

где $q_0 = C_0 \cdot U_0$; $q = C \cdot U$; $U$– напряжение на батарее конденсаторов после замыкания ключа (источник напряжения отключен). До замыкания ключа $K$

$$C_0 = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4}. \qquad (2)$$

Найдем емкость батареи после замыкания ключа.

Узел *3*:

$$q = q_1 + q_3 = q_2 + q_4. \qquad (3)$$

Узел *a*:

$$q_2 - q_1 + q_5 = 0. \qquad (4)$$

Узел *b*:

$$q_4 - q_3 - q_5 = 0. \qquad (5)$$

Контур *a43ba*:

$$\frac{q_1}{C_1} - \frac{q_3}{C_3} + \frac{q_5}{C_5} = 0. \qquad (6)$$

Контур *5ab65*:

$$\frac{q_2}{C_2} - \frac{q_5}{C_5} - \frac{q_4}{C_4} = 0. \qquad (7)$$

Контур *5a4215*:

$$\frac{q_2}{C_2} + \frac{q_1}{C_1} - U = 0. \qquad (8)$$

Из приведенной системы уравнений (1)–(8) находим $C_0$, $q$, $U$. Затем из соотношения $C = \frac{q}{U}$ определяем $C$, а из уравнения (1) $\Delta W$.
Расчеты дают $C_0$ = 0,38 мкФ; $Q$ = 0,85$U$; $C$ = 0,85 мкФ; $\Delta W$ = –0,39 мДж.

Таким образом, при замыкании ключа энергия батареи уменьшилась. Заметим, что заряд ее не изменился, а емкость увеличилась. Уменьшение энергии обусловлено выделением в цепи теплоты (перераспределение зарядов между конденсаторами сопровождалось возникновением электрического тока в соединительных проводах) и излучением электромагнитных волн при изменении силы тока.

*Задача 7*. Найдите электродвижущую силу источника тока в схеме, изображенной на рисунке 16. Заряды на конденсаторах 2$C$ и $C$ соответственно 3$q$и 2$q$. Внутреннее сопротивление источника не учитывать.

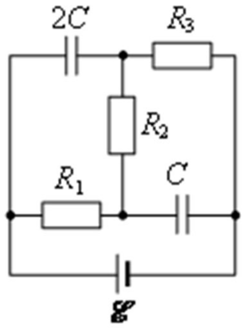



Рис. 16.

*Решение*. Заряды на обкладках конденсаторов определяются из соотношений:

$$3q = 2C \cdot U_1, \tag{1}$$

$$2q = C \cdot U_2, \tag{2}$$

где

$$U_1 = I \cdot (R_1 + R_2), \tag{3}$$

$$U_2 = I \cdot (R_2 + 2R_1), \tag{4}$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{3R_1 + R_2}. \tag{5}$$

С учетом (3), (4), (5) соотношения (1) и (2) примут вид:

$$3q = \frac{2C \cdot \mathcal{E} \cdot (R_1 + R_2)}{3R_1 + R_2}, \tag{6}$$

$$2q = \frac{C \cdot \mathcal{E} \cdot (R_2 + 2R_1)}{3R_1 + R_2}. \tag{7}$$

Делим почленно (1) и (2), получим: $\frac{3}{2} = \frac{2U_1}{U_2}$;

$$U_1 = \frac{3}{4} U_2. \tag{8}$$

С учетом (3) и (4) имеем:

$$I \cdot (R_1 + R_2) = \frac{3}{4} I \cdot (R_2 + 2R_1),$$

$$R_1 + R_2 = \frac{3}{4}R_2 + \frac{3}{2}R_1,$$

$$\frac{1}{2}R_1 = \frac{1}{4}R_2,\ \ R_2 = 2R_1. \qquad (9)$$

Тогда соотношения (6) и (7) примут вид:

$$3q = \frac{2C \cdot \mathcal{E} \cdot 3R_1}{5R_1},\ 3q = \frac{6C \cdot \mathcal{E}}{5},\ \mathcal{E} = \frac{5}{2} \cdot \frac{q}{C}. \qquad (10)$$

Проверим результат по (7):

$$2q = \frac{C \cdot \mathcal{E} \cdot 4R_1}{5R_1},\ \mathcal{E} = \frac{5}{2} \cdot \frac{q}{C}. \qquad (11)$$

*Задача 8*. Какое количество теплоты выделится в цепи (рис. 17) при размыкании ключа?

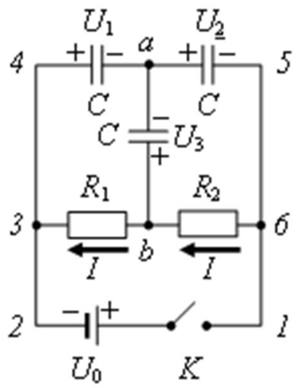



Рис. 17.

*Решение*. Мы указали на схеме предположительные знаки зарядов на обкладках конденсаторов.

По второму правилу Кирхгофа:

$$\begin{cases} I \cdot R_1 = U_1 - U_3, \\ I \cdot R_2 = U_2 + U_3. \end{cases} \qquad (1)$$

По закону сохранения заряда $q_2 = q_1 + q_3$, т.е. $U_2 = U_1 + U_3\ \ (q = C \cdot U)$,

$$I = \frac{U_0}{R_1 + R_2}. \qquad (2)$$

Решив систему, получим:

$$U_1 = \frac{1}{3}I \cdot R_2 + \frac{2}{3}I \cdot R_1,\ U_2 = \frac{1}{3}I \cdot R_1 + \frac{2}{3}I \cdot R_2,$$

$$U_3 = \frac{1}{3}I \cdot (R_2 - R_1).$$

Выделившаяся в цепи теплота

$$Q = \frac{C}{2} \cdot \left(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2\right) = \frac{C \cdot U_0^2}{3\left(R_1 + R_2\right)^2} \cdot \left(R_1^2 + R_2^2 + R_1 \cdot R_2\right). \qquad (3)$$

*Задача 9.* В цепи (рис. 18) $\mathcal{E}_1$ = 1 В, $\mathcal{E}_2$ = 2 В, $\varphi_A - \varphi_B$ = 3 В, $C_1$ = 20 мкФ, $C_2$ = 30 мкФ, $C_3$ = 60 мкФ. Найдите напряжение на каждом конденсаторе.

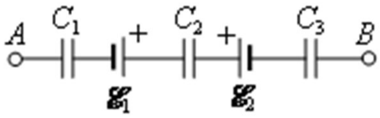



Рис. 18.

*Решение*. Так как конденсаторы соединены последовательно, то их общая емкость

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$, $C$ = 10 мкФ.

Следовательно,

$$q = C \cdot \left(\varphi_A - \varphi_B + \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2\right)$$, $q = 2 \cdot 10^{-5}$ Кл.

При последовательном соединении заряды всех конденсаторов одинаковы. Тогда

$$U_1 = \frac{q}{C_1},\ U_2 = \frac{q}{C_2},\ U_3 = \frac{q}{C_3}$$, $U_1$ = 1 В, $U_2 = \frac{2}{3}$ В, $U_3 = \frac{1}{3}$ В.

*Задача 10.* Два конденсатора с емкостями $C_1$ и $C_2$ присоединены к двум источникам с $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ (рис. 19). Определите напряжение на каждом конденсаторе и разность потенциалов между точками *a* и *b*. Внутреннее сопротивление источников не учитывать.

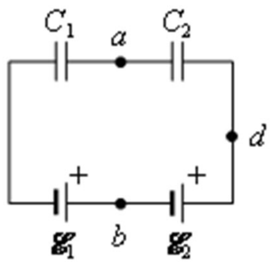



Рис. 19.

*Решение*. Найдем общую емкость этих двух конденсаторов:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \qquad (1)$$

Заряды на них одинаковы (конденсаторы соединены последовательно): $q_1 = q_2$ .·Заряд на каждом конденсаторе равен заряду на эквивалентной емкости *C*, т.е.

$$q_1 = q_2 = q = C \cdot \left(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2\right). \tag{2}$$

Напряжение на конденсаторах:

$$U_1 = \frac{q_1}{C_1} = \frac{C \cdot \left(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2\right)}{C_1} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot \left(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2\right)}{\left(C_1 + C_2\right) \cdot C_1} = \frac{C_2 \cdot \left(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2\right)}{C_1 + C_2}, \tag{3}$$

$$U_2 = \frac{q_2}{C_2} = \frac{C_1 \cdot \left(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2\right)}{C_1 + C_2}. \tag{4}$$

Для нахождения $U_{ab}$ рассмотрим участок цепи *adb* (рис. 20):

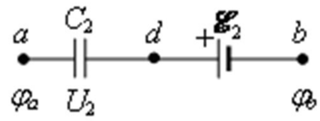



Рис. 20.

Из рисунка видно, что

$$\varphi_a - \varphi_d = U_2,\ \ \varphi_b - \varphi_d = \mathcal{E}_2.$$

Из этих соотношений получаем (вычитая из первого второе):

$$\varphi_a - \varphi_b = U_2 - \mathcal{E}_2.$$

*Задача 11*. Какое количество теплоты выделится в цепи при переключении ключа *K* из положения *1* в положение *2* (рис. 21)?

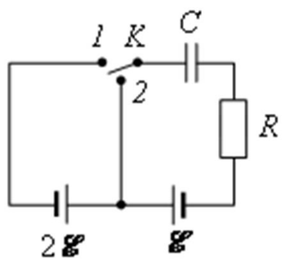



Рис. 21.

*Решение*. При переключении ключа через батарею $\mathcal{E}$ протечет некоторый заряд $\Delta q$. Работа батареи равна $A = \mathcal{E} \cdot \Delta q$ . Эта работа может частично пойти на увеличение энергии, запасенной в конденсаторе, частично – на выделение теплоты в цепи.
Как видно из рис. 21, заряд и, следовательно, энергия, запасенная в конденсаторе, не изменяются при переключении ключа. Меняются лишь знаки зарядов на обкладках.

Следовательно, при переключении ключа *K* через батарею протечет заряд $\Delta q = 2C \cdot \mathcal{E}$ и в цепи выделится количество теплоты $Q = A = 2C \cdot \mathcal{E}^2$.

*Задача 12*. Конденсатор емкостью *C*, заряженный до напряжения $U_0 = \mathcal{E}$, подключается через резистор с большим сопротивлением к источнику тока с ЭДС $5\mathcal{E}$ (рис. 22). Определите количество теплоты, которое выделяется в цепи при зарядке конденсатора до напряжения $U = 5\mathcal{E}$.

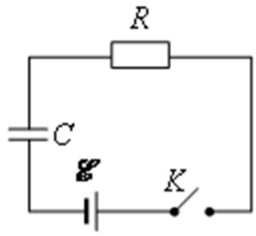



Рис. 22.

*Решение*. Энергия конденсатора до подключения к источнику тока $W_1 = \frac{C \cdot \mathcal{E}^2}{2}$. При подключении конденсатора к источнику тока происходит подзарядка его до напряжения $5\mathcal{E}$. При этом через источник тока протечет заряд $\Delta q = 5C \cdot \mathcal{E} - C \cdot \mathcal{E} = 4C \cdot \mathcal{E}$, а энергия конденсатора увеличится и станет равной $W_2 = \frac{25C \cdot \mathcal{E}^2}{2}$. Источник совершит работу $A = \Delta q \cdot 5\mathcal{E} = 20C \cdot \mathcal{E}^2$.

Часть этой работы затрачивается на увеличение энергии конденсатора, а оставшаяся часть выделится в виде теплоты:

$$A = (W_2 - W_1) + Q,$$

отсюда

$$Q = A - (W_2 - W_1) = 20C \cdot \mathcal{E}^2 - \left(\frac{25C \cdot \mathcal{E}^2}{2} - \frac{C \cdot \mathcal{E}^2}{2}\right) = 8C \cdot \mathcal{E}^2.$$

*Задача 13*. Какое количество теплоты выделится в цепи при переключении ключа *K* из положения *1* в положение *2* (рис. 23), если емкость каждого конденсатора равна *C*?

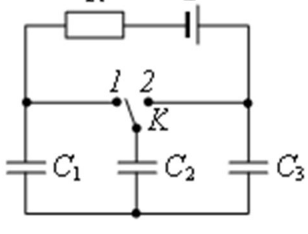



Рис. 23.

*Решение*. При переключении ключа *К* емкость цепи не меняется. Напряжение на системе конденсаторов тоже неизменно и равно $U = \mathscr{E}$. Следовательно, энергия системы не изменяется и вся произведенная батареей работа переходит в теплоту. Для подсчета этой работы необходимо определить заряд, протекший через батарею. До переключения на этом конденсаторе $C_1$ была половина заряда системы, т.е. $q_1 = \frac{C \cdot \mathscr{E}}{3}$ (емкость системы равна $C_0' = \frac{2C \cdot C}{C + 2C}$). После переключения заряда на конденсаторе $C_1$ удвоится. Значит, через батарею протечет заряд $\Delta q = \frac{C \cdot \mathscr{E}}{3}$, и, следовательно, батарея произведет работу $A = \frac{C \cdot \mathscr{E}^2}{3}$. Выделившееся количество теплоты $Q = \frac{C \cdot \mathscr{E}^2}{3}$.


1. Балаш В.А. Задачи по физике и методы их решения. – М., 1983.

2. Буховцев Б.Б. и др. Сборник задач по элементарной физике. – М., 1987.

3. Гладкова Р.А. Сборник вопросов и задач по физике. – М., 1986.

4. Коган Б.Ю. Задачи по физике. – М., 1971.

5. Савченко Н.Е. Решение задач по физике. – Минск, 1988.

6. Сборник задач по физике / под ред. С.М. Козела. – М., 1990.