



корпорация
российский
учебник

«Решение задач о перезарядке конденсаторов»

П.Ю. Боков

к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики физического факультета МГУ,
учитель физики Московской гимназии на Юго-Западе №1543



Закон изменения механической энергии:

- $$П_0 + K_0 + A_{\text{тр}} + A_{\text{ex}} = П_{\text{к}} + K_{\text{к}}$$

Закон сохранения механической энергии:

- если $A_{\text{тр}} + A_{\text{ex}} = 0$,
то:
$$П_0 + K_0 = П_{\text{к}} + K_{\text{к}} = \text{const}$$

Первый закон термодинамики

$$\underbrace{P_0 + K_0}_{\text{было}} + \underbrace{A_{\text{тр}} + A_{\text{ex}}}_{\text{изменение}} = \underbrace{P_k + K_k}_{\text{стало}}$$

было изменение стало

$$U_0 + A + Q = U_k$$

В электрической цепи:

$$W_{\text{эл0}} + W_{\text{магн0}} + A_{\text{ист}} + A_{\text{мех}} = W_{\text{эл}} + W_{\text{магн}} + Q_{\text{Дж}} + Q_{\text{изл}}$$



было

изменение

стало

выделилось

Задача 1 (Физика – 11)

Задача 1

Конденсатор ёмкостью C , имеющий заряд q_0 , подключают к источнику постоянного тока (с ЭДС \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r) через сопротивление $R = 2r$ так, как показано на рис. 62. Определите количество теплоты, которое выделится на сопротивлении R за время перезарядки конденсатора.

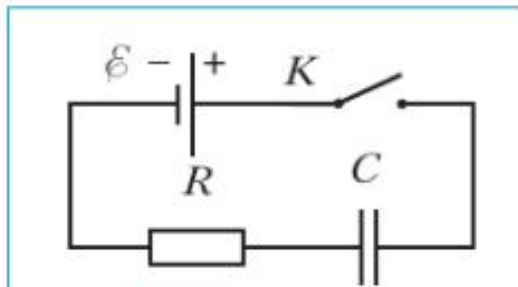


Рис. 62

После замыкания ключа K в цепи будет течь ток до тех пор, пока напряжение U_C на конденсаторе не станет равным ЭДС источника тока. Поэтому после перезарядки конденсатора его заряд q станет равным:

Решение.

После замыкания ключа K в цепи будет течь ток до тех пор, пока напряжение U_C на конденсаторе не станет равным ЭДС источника тока. Поэтому после перезарядки конденсатора его заряд q станет равным:

Глава 1. Постоянный электрический ток ■ _____

$$q = C \cdot U_C = C \cdot \mathcal{E}. \quad (7)$$

Следовательно, по цепи за время перезарядки протечёт заряд Δq , равный разности конечного q и начального q_0 зарядов конденсатора:

$$\Delta q = q - q_0 = C \cdot \mathcal{E} - q_0. \quad (8)$$

Таким образом, за время перезарядки источник совершит работу A , равную произведению ЭДС источника и протёкшего через него заряда Δq :

$$A = \mathcal{E} \cdot \Delta q. \quad (9)$$

До замыкания ключа начальная энергия W_0 электрического поля конденсатора была равна:

$$W_0 = \frac{q_0^2}{2C}. \quad (10)$$

После окончания перезарядки конечная энергия W_k электрического поля конденсатора будет равна:

$$W_k = \frac{q^2}{2C}. \quad (11)$$

Согласно закону изменения энергии, сумма начальной энергии W_0 и работы A источника должна быть равна сумме конечной энергии W_k системы и энергии Q , выделившейся в виде количеств теплоты на сопротивлениях r и R и излучения, обусловленного ускоренным движением зарядов в цепи при перезарядке конденсатора:

$$W_0 + A = W_k + Q. \quad (12)$$

Из (12) с учётом (9)–(11) получаем:

$$Q = (W_0 - W_k) + A = \frac{q_0^2 - q^2}{2C} + \mathcal{E} \cdot (q - q_0). \quad (13)$$

Таким образом, выделившаяся энергия Q равна сумме двух слагаемых. Первое — это разность начальной и конечной энергий электрического поля конденсатора. Второе — это работа источника тока. Прежде чем подставлять в (13) значение q из (7), обсудим полученный результат.

Если начальное напряжение $U_{C0} = \frac{q_0}{C}$ на конденсаторе меньше, чем ЭДС \mathcal{E} источника, то $q_0 < q$. В этом случае заряд конденсатора и его энергия при перезарядке будут увеличиваться. Поэтому первое слагаемое в (13) будет отрицательным. Напротив, поскольку в этом случае $\Delta q = q - q_0 > 0$, то второе слагаемое — работа источника тока — будет положительным.

■ Электродинамика (продолжение)

Если же начальное напряжение на конденсаторе U_{C_0} больше ЭДС \mathcal{E} источника, то $q_0 > q$. В этом случае при перезарядке заряд конденсатора и его энергия будут уменьшаться. Следовательно, первое слагаемое в (10) будет положительным. Напротив, так как $\Delta q = q - q_0 < 0$, то второе слагаемое — работа источника тока — будет отрицательным.

Понятно, что если $U_{C_0} = \mathcal{E}$, то $q_0 = q$ и перезарядки не будет. Другими словами, при таком условии тока в цепи после замыкания ключа K не будет. Поэтому из (13) получим: $Q = 0$.

Теперь подставим (7) в (13). После элементарных преобразований получаем:

$$Q = \frac{(q_0 - C \cdot \mathcal{E})^2}{2C}. \quad (14)$$

Обратим внимание на то, что полученное значение Q всегда неотрицательно. Это означает, что количество выделившейся энергии Q (за исключением случая $q_0 = C \cdot \mathcal{E}$) будет положительным.

Будем считать, что потери энергии на излучение, обусловленное ускоренным движением зарядов в цепи при перезарядке, пренебрежимо малы. Тогда количество выделившейся теплоты определяется соотношением (14).

Чтобы определить, какое количество теплоты Q_R выделилось на сопротивлении R , а какое Q_r – на внутреннем сопротивлении r источника, воспользуемся законом Джоуля – Ленца. Сила тока в цепи при перезарядке конденсатора непрерывно изменяется. Поэтому рассмотрим достаточно малый промежуток времени Δt , в течение которого силу тока в цепи можно считать постоянной. За этот промежуток времени на внутреннем сопротивлении r источника и сопротивлении R выделяются соответственно количества теплоты ΔQ_r и ΔQ_R :

$$\Delta Q_r = I^2 \cdot r \cdot \Delta t, \quad (15)$$

$$\Delta Q_R = I^2 \cdot R \cdot \Delta t, \quad (16)$$

где I – сила тока в цепи в течение промежутка времени Δt .

По условию $R = 2r$. Поэтому из (15) и (16) получаем:

$$\frac{\Delta Q_R}{\Delta Q_r} = \frac{R}{r} = 2. \quad (17)$$

Соотношение (17) справедливо для любого достаточно малого промежутка времени Δt . Следовательно, оно верно и для всего времени перезарядки:

$$\frac{Q_R}{Q_r} = 2. \quad (18)$$

Глава 1. Постоянный электрический ток ■ _____

Поскольку общее количество выделившейся теплоты $Q = Q_R + Q_r$, с учётом (18) и (14) получаем ответ:

$$Q_R = \frac{(q_0 - C \cdot \mathcal{E})^2}{2C} \cdot \frac{R}{R+r} = \frac{(q_0 - C \cdot \mathcal{E})^2}{3C}.$$

Задача 2 (Физика – 11)

Задача 2

Определите количество теплоты, которое выделится на резисторе R после переключения ключа K из положения 1 в положение 2 в схеме, показанной на рис. 63. Потерями энергии на излучение пренебречь.

Решение.

Будем считать, что ключ K находится в положении 1 достаточно долго. Тогда сила тока в цепи равна нулю. Поэтому напряжение между выводами резистора также равно нулю. Следовательно, напряжение между левой и правой пластинами конденсатора равно: $U = 3\varepsilon - \varepsilon = 2\varepsilon$. Таким образом, начальный заряд q_0 конденсатора равен:

$$q_0 = C \cdot U = C \cdot 2\varepsilon. \quad (19)$$

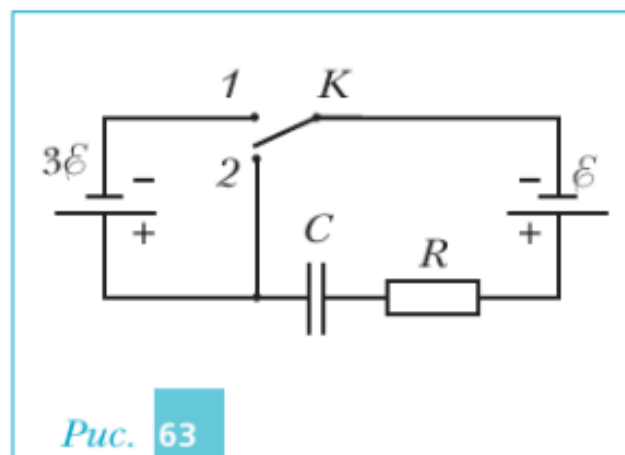


Рис. 63

При этом левая пластина конденсатора заряжена положительно, а правая – отрицательно. Начальная энергия заряженного конденсатора:

$$W_0 = \frac{q_0^2}{2C} = 2C \cdot \mathcal{E}^2. \quad (20)$$

После переключения ключа K в положение 2 начнётся перезарядка конденсатора, и в цепи потечёт электрический ток. Соответственно, на резисторе R будет выделяться определённое количество теплоты. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока между правой и левой пластинами конденсатора не установится разность потенциалов, равная ЭДС источника тока в образовавшейся цепи: $\Delta\varphi = \mathcal{E}$. Заряд конденсатора станет равен $q_k = C \cdot \mathcal{E}$. При этом правая пластина конденсатора будет заряжена положительно, а левая – отрицательно. Таким образом, за время перезарядки конденсатора по цепи пройдёт заряд $\Delta q = q_0 + q_k$, так как при разрядке конденсатора до нулевой разности потенциалов протекает заряд q_0 , а при зарядке конденсатора до конечной разности потенциалов противоположной полярности протекает заряд q_k .

Следовательно, за время перезарядки сторонние силы совершат работу, равную произведению ЭДС источника на прошедший через него заряд:

■ Электродинамика (продолжение)

$$A = \mathcal{E} \cdot \Delta q = \mathcal{E} \cdot (q_0 + q_k) = \mathcal{E} \cdot (2C \cdot \mathcal{E} + C \cdot \mathcal{E}) = 3C \cdot \mathcal{E}^2. \quad (21)$$

Конечная энергия конденсатора равна:

$$W_k = \frac{q_k^2}{2C} = \frac{C \cdot \mathcal{E}^2}{2}. \quad (22)$$

Согласно закону сохранения энергии, сумма начальной энергии W_0 конденсатора и работы сторонних сил по переносу заряда Δq равна сумме конечной энергии W_k конденсатора и выделившегося на резисторе R количества теплоты Q :

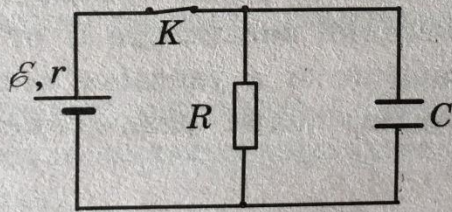
$$W_0 + A = W_k + Q. \quad (23)$$

Подставив (20)–(22) в (23), получаем ответ:

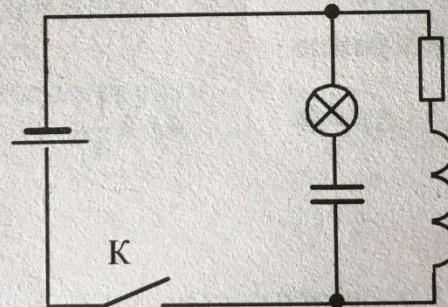
$$Q = 2C \cdot \mathcal{E}^2 + 3C \cdot \mathcal{E}^2 - \frac{C \cdot \mathcal{E}^2}{2} = \frac{9}{2}C \cdot \mathcal{E}^2.$$

Что в ЕГЭ?

В электрической схеме, показанной на рисунке, ключ K замкнут. Заряд конденсатора $q = 2 \text{ мкКл}$, ЭДС батарейки $\mathcal{E} = 24 \text{ В}$, ее внутреннее сопротивление $r = 5 \text{ Ом}$, сопротивление резистора $R = 25 \text{ Ом}$. Найдите количество теплоты, которое выделяется на резисторе после размыкания ключа K в результате разряда конденсатора. Потерями на излучение пренебречь.

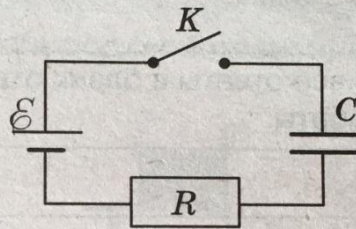


В электрической цепи, показанной на рисунке, ЭДС источника тока равна $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$; емкость конденсатора $C = 2 \text{ мФ}$; индуктивность катушки $L = 5 \text{ мГн}$, сопротивление лампы $r = 5 \text{ Ом}$ и сопротивление резистора $R = 3 \text{ Ом}$. В начальный момент времени ключ K замкнут. Какое количество теплоты Q выделится в лампе после размыкания ключа? Внутренним сопротивлением источника тока, катушки и проводов пренебречь.



Что в ЕГЭ?

Конденсатор подключен к источнику тока последовательно с резистором $R = 20$ кОм (см. рис.). В момент времени $t = 0$ ключ замыкают. В этот момент конденсатор полностью разряжен. Результаты измерений силы тока в цепи, выполненных с точностью ± 1 мкА, представлены в таблице.



$t, \text{с}$	0	1	2	3	4	5	6
$I, \text{мкА}$	300	110	40	15	5	2	1

Внутренним сопротивлением источника и сопротивлением проводов пренебречь. Выберите два верных утверждения о процессах, наблюдаемых в опыте.

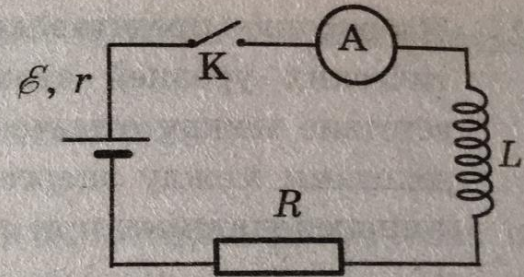
- 1) Ток через резистор в процессе наблюдения увеличивается.
- 2) Через 6 с после замыкания ключа конденсатор полностью зарядился.
- 3) ЭДС источника тока составляет 6 В.
- 4) В момент времени $t = 3$ с напряжение на резисторе равно 0,6 В.
- 5) В момент времени $t = 3$ с напряжение на конденсаторе равно 5,7 В.

Ответ:

<input type="text"/>	<input type="text"/>
----------------------	----------------------

Что в ЕГЭ?

24. В схеме, показанной на рисунке, ключ K замыкают в момент времени $t = 0$. Показания амперметра в последовательные моменты времени приведены в таблице. Сопротивление резистора равно 100 Ом . Сопротивлением проводов и амперметра, активным сопротивлением катушки индуктивности и внутренним сопротивлением источника пренебречь.



$t, \text{ мс}$	0	50	100	150	200	250	300	400	500	600	700
$I, \text{ мА}$	0	23	38	47	52	55	57	59	59	60	60

Выберите два верных утверждения о процессе, происходящем в контуре.

- 1) Напряжение на резисторе сначала увеличивается, а затем не меняется.
- 2) Напряжение на резисторе не меняется с течением времени.
- 3) ЭДС источника равна $3,4 \text{ В}$.
- 4) Напряжение на катушке в момент времени 300 мс равно 0 .
- 5) Напряжение на катушке в момент времени 0 мс максимально.

Ответ:

--	--

Олимпиады (Сборник С.М. Козела)

✓ 3.89. Конденсатор емкости C , заряженный до напряжения \mathcal{E} , подключается через резистор с большим сопротивлением к батарее с ЭДС $5\mathcal{E}$ (рис. 3.41). Определить количество теплоты, которое выделяется в цепи при зарядке конденсатора до напряжения $5\mathcal{E}$.

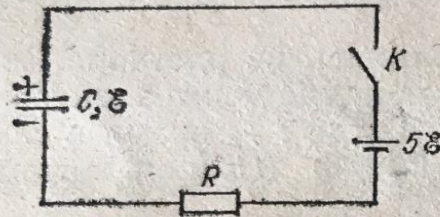


Рис. 3.41

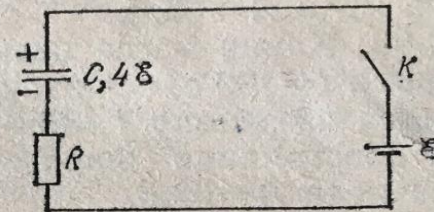


Рис. 3.42

✓ 3.90. Конденсатор емкости C , заряженный до напряжения $4\mathcal{E}$, разряжается через резистор с большим сопротивлением R и батарею с ЭДС \mathcal{E} (рис. 3.42). Найти количество теплоты, выделившееся при разрядке конденсатора.

✓ 3.91. Какое количество теплоты выделится в цепи при переключении ключа K из положения 1 в положение 2 (рис. 3.43)?

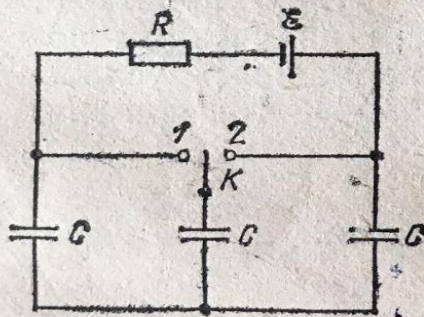


Рис. 3.43

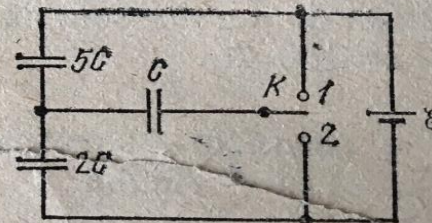


Рис. 3.44



УМК «Физика» авторов А.В. Грачёва, П.Ю. Бокова и других:

7 – 9 класс

<https://drofa-ventana.ru/kompleks/umk-liniya-umk-a-v-gracheva-fizika-7-9/>

10 – 11 класс (базовый и углублённый уровни):

<https://drofa-ventana.ru/kompleks/umk-liniya-umk-a-v-gracheva-fizika-10-11-baz-uglubl/>

Состав УМК 7 – 9 класс



- ✓ Учебник в печатной и электронной формах
- ✓ Программы – в свободном доступе на сайте <http://www.drofa-ventana.ru/>
- ✓ Проектирование учебного курса
- ✓ Тетради для лабораторных работ
- ✓ Рабочие тетради

Состав УМК 10 – 11 класс Базовый и углублённый уровни



✓ Учебник в печатной и электронной формах

✓ Рабочие программы – в свободном доступе на сайте <http://www.drofa-ventana.ru/>

✓ Рабочие тетради



корпорация

российский
учебник

Боков Павел Юрьевич

Pavel_Bokov@rambler.ru