

## Количество теплоты. Конденсатор

### Содержание

1	МФТИ и «Физтех»	4
2	«Курчатов»	11
3	Всероссийская олимпиада школьников по физике	11
4	Московская олимпиада школьников по физике	16

В данной листке рассматриваются задачи на расчёт количества теплоты, которое выделяется в цепях, состоящих из резисторов и конденсаторов. При решении задач необходимо помнить следующее.

1. Заряженный конденсатор ёмкостью  $C$  обладает энергией

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C},$$

где  $U$  — напряжение на конденсаторе,  $q$  — заряд конденсатора.

2. Если через источник тока с ЭДС  $\mathcal{E}$  проходит заряд  $q$ , то сторонние силы источника совершают работу

$$A_{\text{ист}} = q\mathcal{E}.$$

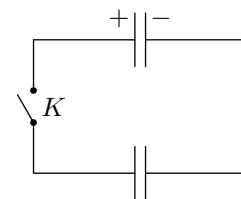
Эта работа называется *работой источника*.

3. Работа источника идёт на изменение энергии конденсаторов, включённых в цепь, а также превращается в тепло, выделяющееся на резисторах цепи:

$$A_{\text{ист}} = \Delta W + Q.$$

Обычно предполагается, что сопротивления резисторов достаточно велики, так что токи после замыкания ключа возрастают достаточно медленно и поэтому потерями на излучение можно пренебречь<sup>1</sup> (в противном случае см. задачу 1).

**ЗАДАЧА 1.** Конденсатор ёмкостью  $C$ , заряд которого равен  $q$ , соединён через разомкнутый ключ  $K$  с таким же незаряженным конденсатором (см. рисунок). Ключ замыкают. Найдите суммарную энергию конденсаторов после установления равновесия. Куда «исчезла» половина начальной энергии?



$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \tau} = M$$

**ЗАДАЧА 2.** Разности потенциалов на конденсаторах ёмкостями  $C_1$  и  $C_2$  равны  $U_1$  и  $U_2$ . Конденсаторы через резистор соединяют между собой. Найдите энергию, которая выделится при перезарядке конденсаторов в двух случаях:

- а) соединены одноимённо заряженные пластины;
- б) соединены разноимённо заряженные пластины.

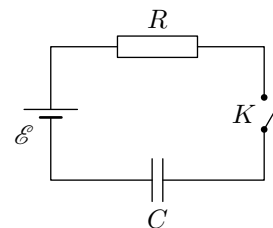
$$\frac{\epsilon_0 + \epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1(\epsilon_2 + \epsilon_1)\epsilon_0 \tau_1 \tau_2} = \partial \quad (g; \frac{\epsilon_0 + \epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_2(\epsilon_1 + \epsilon_2)\epsilon_0 \tau_1 \tau_2} = \partial \quad (e$$

<sup>1</sup>Если заряженная частица движется с ускорением, то она излучает электромагнитные волны. Эти волны уносят тем больше энергии, чем больше ускорение частицы.

ЗАДАЧА 3. Плоский воздушный конденсатор заполнили жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  и зарядили, сообщив ему энергию  $W$ . Затем конденсатор отсоединили от источника, слили диэлектрик и разрядили. Какая энергия выделилась при разрядке?

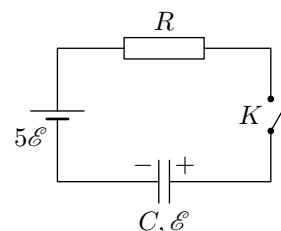
$$\boxed{M^3 = 0 \text{ (в)}}$$

ЗАДАЧА 4. Источник тока с ЭДС  $\mathcal{E}$ , резистор с большим сопротивлением  $R$  и конденсатор ёмкостью  $C$  подключены последовательно друг с другом через ключ  $K$  (см. рисунок). Вначале ключ разомкнут и конденсатор не заряжен. Найдите количество теплоты, которое выделится в цепи после замыкания ключа в процессе зарядки конденсатора.



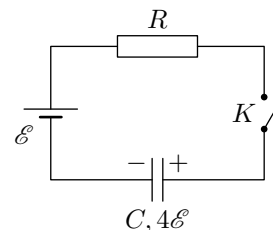
$$\boxed{\frac{\tau}{\tau^2 \mathcal{E}} = 0}$$

ЗАДАЧА 5. Конденсатор ёмкостью  $C$ , заряженный до напряжения  $\mathcal{E}$ , подключается через резистор с большим сопротивлением  $R$  к батарее с ЭДС  $5\mathcal{E}$  (см. рисунок). Определите количество теплоты, которое выделится в цепи при зарядке конденсатора до напряжения  $5\mathcal{E}$ .



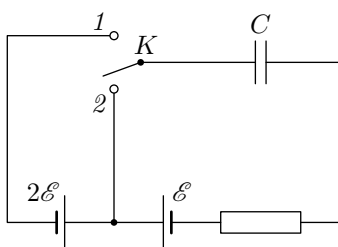
$$\boxed{\frac{\tau}{\tau^2 \mathcal{E}} = 0}$$

ЗАДАЧА 6. Конденсатор ёмкостью  $C$ , заряженный до напряжения  $4\mathcal{E}$ , разряжается через резистор с большим сопротивлением  $R$  и батарею с ЭДС  $\mathcal{E}$  (см. рисунок). Найдите количество теплоты, выделившейся при разрядке конденсатора.



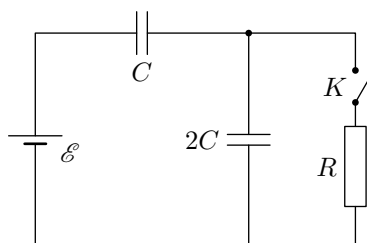
$$\boxed{\frac{\tau}{\tau^2 \mathcal{E}} = 0}$$

ЗАДАЧА 7. Какое количество теплоты выделится в цепи при переключении ключа  $K$  из положения 1 в положение 2 (см. рисунок)?



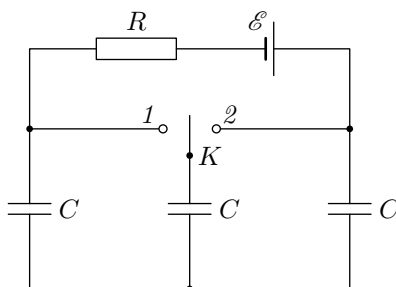
$$\boxed{\tau^2 \mathcal{E} = 0}$$

ЗАДАЧА 8. Какое количество теплоты выделится на резисторе  $R$  после замыкания ключа  $K$  (см. рисунок)? Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.



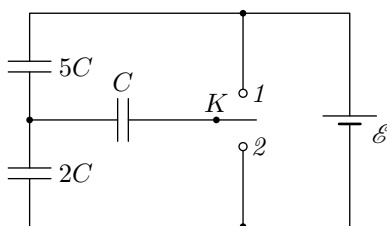
$$\frac{9}{2^2 C} = \varnothing$$

ЗАДАЧА 9. Какое количество теплоты выделится в цепи при переключении ключа  $K$  из положения 1 в положение 2 (см. рисунок)?



$$\frac{\mathcal{E}}{2^2 C} = \varnothing$$

ЗАДАЧА 10. Какое количество теплоты выделится в цепи при переключении ключа  $K$  из положения 1 в положение 2 (см. рисунок)?



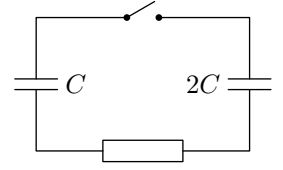
$$\frac{9\mathcal{E}}{2^2 C} = \varnothing$$

ЗАДАЧА 11. Между обкладками плоского конденсатора расположена диэлектрическая пластина ( $\varepsilon = 3$ ), заполняющая весь объём конденсатора. Конденсатор через последовательно соединённый резистор подключён к батарее с ЭДС  $\mathcal{E} = 100$  В. Пластину быстро удаляют так, что заряд на конденсаторе не успевает измениться. Какая энергия выделится после этого в цепи в виде теплоты? Ёмкость незаполненного конденсатора  $C_0 = 100$  мкФ.

$$\frac{9\mathcal{E}}{2^2 C} = \varnothing$$

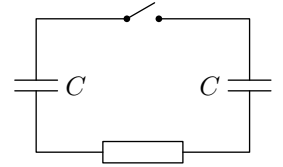
# 1 МФТИ и «Физтех»

ЗАДАЧА 12. («Физтех», 2008) В цепи, показанной на рисунке, ёмкости конденсаторов равны  $C$  и  $2C$ . Конденсатор ёмкостью  $C$  заряжен до напряжения  $U_0$ , конденсатор ёмкостью  $2C$  не заряжен. Какое количество теплоты выделится в резисторе после замыкания ключа?



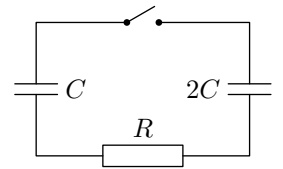
$$\frac{\varepsilon}{\partial \Omega} = \partial$$

ЗАДАЧА 13. («Физтех», 2008) В цепи, показанной на рисунке, ёмкость каждого конденсатора равна  $C$ . Левый конденсатор заряжен до напряжения  $U_0$ , а правый — до напряжения  $3U_0$ . У обоих конденсаторов положительный заряд находится на верхней обкладке. Найдите  $U_0$ , если известно, что в резисторе после замыкания ключа выделилось количество теплоты  $Q$ .



$$\frac{\partial}{\partial} \Lambda = {}^0 \Omega$$

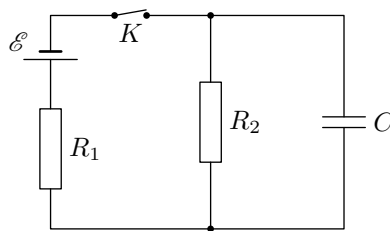
ЗАДАЧА 14. («Физтех», 2009) В цепи, показанной на рисунке, конденсатор ёмкостью  $C$  заряжен до напряжения  $U_0$ , а конденсатор ёмкостью  $2C$  — до напряжения  $3U_0$ . Одноимённо заряженные обкладки соединены резистором с сопротивлением  $R$ . Ключ замыкают на некоторое время, а затем размыкают.



- 1) Найдите ток в цепи сразу после замыкания ключа.
- 2) Какое количество теплоты выделилось в цепи, если в момент размыкания ключа ток в цепи был в два раза меньше начального?

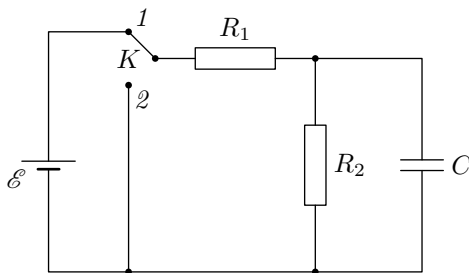
$$\frac{\partial \Omega}{\partial} = \partial \left( \tau : \frac{\eta}{\partial \varepsilon} = {}^0 I \right)$$

ЗАДАЧА 15. (МФТИ, 1995) Какое количество теплоты выделится в схеме (см. рисунок) после размыкания ключа  $K$ ? Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.



$$\left( \frac{\varepsilon \eta + \eta}{\varepsilon} \right) \frac{\varepsilon}{\partial} = \partial$$

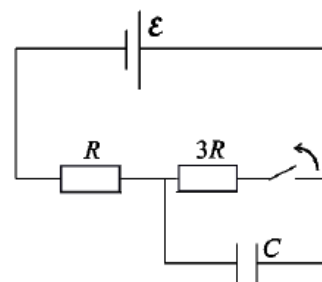
ЗАДАЧА 16. (МФТИ, 1995) Какое количество теплоты выделится на резисторе  $R_2$  в схеме, изображённой на рисунке, после перемещения ключа  $K$  из положения 1 в положение 2? Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.



$$\frac{\varepsilon^2 (2R_1 + R_2) C}{2R_1 R_2} \tau \mathcal{Q} = \mathcal{Q}$$

ЗАДАЧА 17. («Физтех», 2016, 11) В электрической цепи, схема которой показана на рисунке, все элементы идеальные, их параметры указаны, ключ замкнут, режим установился.

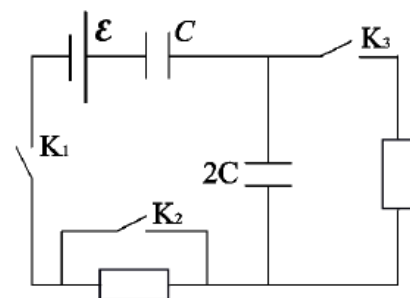
- 1) Найти напряжение на конденсаторе при замкнутом ключе.
- 2) Найти ток через источник сразу после размыкания ключа.
- 3) Какое количество теплоты выделится в цепи после размыкания ключа?



$$\tau \mathcal{Q} \frac{\varepsilon^2}{I} = \mathcal{Q} \quad (\varepsilon : \frac{R}{\rho} = I \quad \tau : \frac{R}{\varepsilon} = \Omega \quad I)$$

ЗАДАЧА 18. («Физтех», 2016, 11) В электрической цепи (см. рисунок) все элементы идеальные, их параметры указаны, ключи разомкнуты, конденсаторы не заряжены. Сначала замыкают ключ  $K_1$ . После установления режима в цепи замыкают ключ  $K_2$ . Затем замыкают ключ  $K_3$  и размыкают его, когда напряжение на конденсаторе  $C$  становится в 4 раза больше напряжения на конденсаторе  $2C$ .

- 1) Найти отношение зарядов на конденсаторе  $2C$  после размыкания  $K_3$  и перед замыканием  $K_3$ .
- 2) Найти количество теплоты, которое выделится в цепи при замкнутом ключе  $K_3$ .



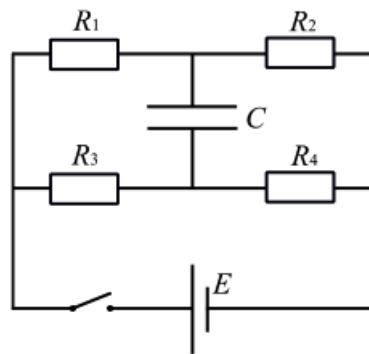
$$\tau \mathcal{Q} \frac{\varepsilon^2}{I} = \mathcal{Q} \quad (\tau : \varepsilon / I)$$

ЗАДАЧА 19. («Физтех», 2017, 11) В цепи, схема которой показана на рисунке, все элементы можно считать идеальными, ЭДС батареи  $E$ , сопротивления резисторов  $R_1 = r$ ,  $R_2 = 4r$ ,  $R_3 = 3r$ ,  $R_4 = 2r$ . До замыкания ключа ток в цепи отсутствовал. Ключ замыкают, а затем через большой промежуток времени ключ размыкают.

1) Найти напряжение  $U$  на конденсаторе в установившемся режиме при замкнутом ключе.

2) Найти количество  $Q$  теплоты, выделившейся на резисторе  $R_1$  после размыкания ключа.

3) Найти ток  $I_0$ , текущий через конденсатор сразу после замыкания ключа.



$$\frac{U_C}{E} = 0,1 \quad (\varepsilon; \tau; C; R_1; R_2; R_3; R_4) = 0,1 \quad (\tau; \varepsilon; R_1; R_2; R_3; R_4) = 0,1$$

ЗАДАЧА 20. (МФТИ, 1995) Батарея с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$  включена через ключ  $K$  в схему, параметры которой указаны на рисунке. В начальный момент времени ключ  $K$  разомкнут, конденсаторы не заряжены. Ключ замыкают.

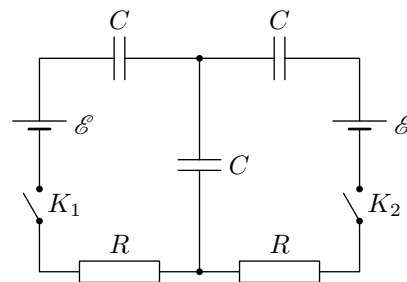
- 1) Определить начальный ток через батарею.
- 2) Какое количество теплоты выделится во всей схеме после замыкания ключа?

$$\tau \mathcal{E} C + \tau C + \tau C \frac{\mathcal{E}}{r} = 0,1 \quad (\tau; \frac{\mathcal{E}}{r} = 0,1 \quad (1)$$

ЗАДАЧА 21. (МФТИ, 1995) Две батареи с ЭДС  $\mathcal{E}$  каждая включены в схему, параметры которой указаны на рисунке. В начальный момент ключи  $K_1$  и  $K_2$  разомкнуты, конденсаторы не заряжены. Ключи одновременно замыкают.

- 1) Найти начальный ток через батарею.
- 2) Какое количество теплоты выделится во всей схеме после замыкания ключей?

Внутренним сопротивлением батарей пренебречь.

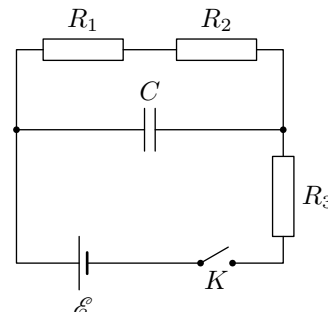


$$\tau \mathcal{E} C \frac{\mathcal{E}}{r} = 0,1 \quad (\tau; \frac{\mathcal{E}}{r} = 0,1 \quad (1)$$

ЗАДАЧА 22. (МФТИ, 1997) В электрической схеме (см. рисунок) в начальный момент ключ  $K$  замкнут.

- 1) Какое количество тепла выделится в цепи после размыкания ключа?
- 2) Какое количество тепла выделится на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ ?

Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , ёмкость конденсатора  $C$  и ЭДС батареи  $\mathcal{E}$  считать заданными. Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.



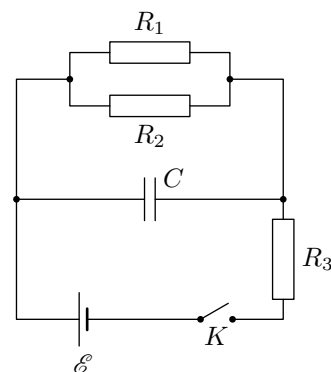
$$0 = \varepsilon \tau, \quad \frac{\tau(\varepsilon R_1 + \varepsilon R_2 + \tau R_3)}{\tau(\varepsilon R_1 + \varepsilon R_2)} = 0,1 \quad (\tau; \frac{\tau(\varepsilon R_1 + \varepsilon R_2 + \tau R_3)}{\tau(\varepsilon R_1 + \varepsilon R_2)} = 0,1 \quad (1)$$

Задача 23. (МФТИ, 1997) В электрической схеме (см. рисунок) в начальный момент ключ  $K$  замкнут. После размыкания ключа на резисторе  $R_1$  выделяется тепло  $Q_1$ .

- 1) Какое количество тепла выделится на резисторе  $R_2$ ?
- 2) Чему равна ЭДС батареи  $\mathcal{E}$ ?

Сопротивления  $R_1, R_2, R_3$  и ёмкость конденсатора  $C$  известны.

$$\frac{\varepsilon_H}{\varepsilon_H + 1_H} \frac{\rho}{1 \partial \varepsilon} \wedge \frac{\varepsilon_H 1_H}{\varepsilon_H \varepsilon_H + \varepsilon_H 1_H + \varepsilon_H 1_H} = \rho (\varepsilon : \frac{\varepsilon_H}{1_H} 1 \partial = \varepsilon \partial (1$$

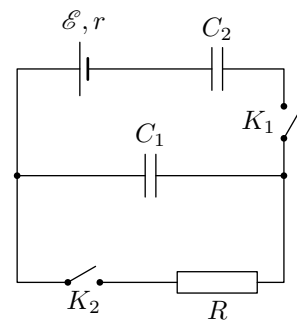


Задача 24. (МФТИ, 1999) В схеме, изображённой на рисунке, при разомкнутых ключах  $K_1$  и  $K_2$  конденсаторы с ёмкостями  $C_1$  и  $C_2$  не заряжены. ЭДС батареи  $\mathcal{E}$ , внутреннее сопротивление —  $r$ . Сначала замыкают ключ  $K_1$ , а после установления стационарного состояния в схеме замыкают ключ  $K_2$ .

- 1) Чему равен ток через батарею сразу после замыкания ключа  $K_1$ ?

- 2) Какое количество теплоты выделится во всей схеме после замыкания ключа  $K_2$ ?

$$\frac{(\varepsilon \rho + 1 \rho) \varepsilon}{\varepsilon \rho \varepsilon \rho} = \partial (\varepsilon : \frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \Gamma (1$$

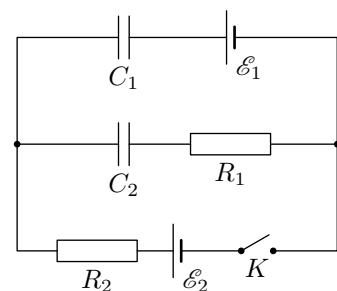


Задача 25. (МФТИ, 2003) В электрической схеме, представленной на рисунке, ключ  $K$  разомкнут. ЭДС батарей равны  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ . Ёмкости конденсаторов —  $C_1 = C_2 = C$ .

- 1) Найти заряд, протекший через батарею с ЭДС  $\mathcal{E}_2$  после замыкания ключа  $K$ .

- 2) Какое количество теплоты выделится в цепи после замыкания ключа  $K$ ?

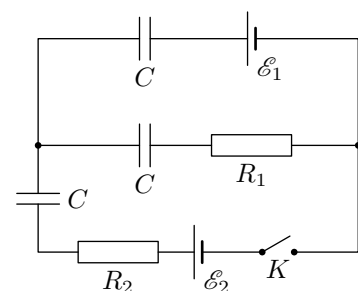
$$\varepsilon (1 \rho - \varepsilon \rho \varepsilon) \rho \frac{\rho}{1} = \partial (\varepsilon : (1 \rho - \varepsilon \rho \varepsilon) \rho = b (1$$



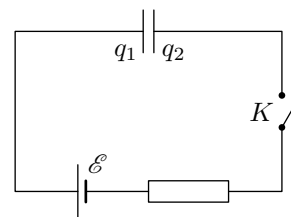
Задача 26. (МФТИ, 2003) В электрической схеме, представленной на рисунке, ключ  $K$  разомкнут. ЭДС батарей связаны условием  $\mathcal{E}_1 \neq 2\mathcal{E}_2$ . После замыкания ключа  $K$  батарея с ЭДС  $\mathcal{E}_1$  совершила работу  $A$ .

- 1) Найти ёмкости конденсаторов  $C$ .
- 2) Найти работу батареи с ЭДС  $\mathcal{E}_2$  после замыкания ключа  $K$ .

$$\frac{1 \rho}{\varepsilon} \rho \varepsilon = A' (\varepsilon : \frac{(\varepsilon \rho \varepsilon - 1 \rho) 1 \rho}{\rho} = \rho (1$$



Задача 27. (МФТИ, 2004) В схеме, представленной на рисунке, две одинаковые проводящие пластины с площадью  $S$  расположены на малом расстоянии  $d$ . Пластины положительно заряжены: на левой — заряд  $q_1$ , на правой — заряд  $q_2$ . Ключ  $K$  замыкают.



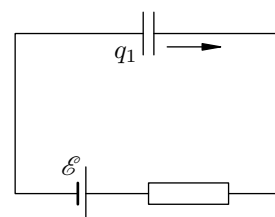
1) Найти заряды на пластинах после установления равновесного состояния.

2) Какое количество теплоты выделится в цепи после замыкания ключа  $K$ ?

ЭДС батареи равна  $\mathcal{E}$ . Считать, что до и после замыкания ключа заряды (по модулю) проводов, резистора и источника пренебрежимо малы.

$$\frac{pS^0 \varepsilon \delta}{z((1b - zb)p + \mathcal{E}S^0 \varepsilon z)} = \mathcal{D} \left( z : \frac{p}{\mathcal{E}S^0 \varepsilon} - \frac{z}{zb + 1b} = zb : \frac{p}{\mathcal{E}S^0 \varepsilon} + \frac{z}{zb + 1b} = 1b \right) (1)$$

Задача 28. (МФТИ, 2004) В схеме, представленной на рисунке, батарея с постоянной ЭДС  $\mathcal{E}$  подключена через резистор к двум одинаковым проводящим пластинам площадью  $S$  и малым расстоянием  $d$  между ними. Обе пластины положительно заряжены, причём на левой пластине находится заряд  $q_1$ , а на правой — некоторый неизвестный заряд. Правую пластину быстро смещают на расстояние  $d$  вправо (заряды пластин за время перемещения не изменяются).



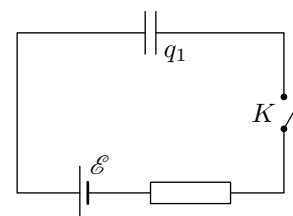
1) Найти заряды пластин после установления равновесия.

2) Какое количество теплоты выделится в цепи после перемещения пластины к моменту установления равновесного состояния?

Считать, что до и после смещения пластины заряды (по модулю) проводов, резистора и источника пренебрежимо малы.

$$\frac{pV}{z\mathcal{E}S^0 \varepsilon} = \mathcal{D} \left( z : \frac{pZ}{\mathcal{E}S^0 \varepsilon} + 1b = zb : \frac{pZ}{\mathcal{E}S^0 \varepsilon} + 1b = 1b \right) (1)$$

Задача 29. (МФТИ, 2004) В электрической схеме, представленной на рисунке, две одинаковые проводящие пластины с площадью  $S$  расположены на малом расстоянии  $d$  друг от друга. Обе пластины заряжены, причём на правой находится положительный заряд  $q_1$ . Ключ  $K$  замыкают.



1) Найти начальный заряд левой пластины, если после замыкания ключа  $K$  батарея совершила работу  $A$ .

2) Какое количество теплоты выделилось в цепи после замыкания ключа  $K$ ?

ЭДС батареи равна  $\mathcal{E}$ . Считать, что до и после замыкания ключа заряды (по модулю) проводов, резистора и источника пренебрежимо малы.

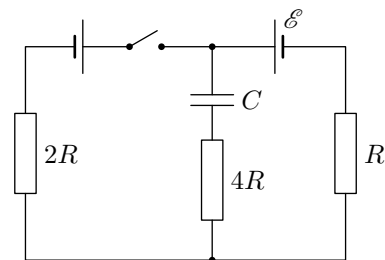
$$\frac{z\mathcal{E}S^0 \varepsilon}{p_z V} = \mathcal{D} \left( z : \frac{p}{\mathcal{E}S^0 \varepsilon} + \frac{\mathcal{E}}{Vz} - 1b = zb \right) (1)$$



Задача 30. («Физтех», 2013) В схеме, показанной на рисунке, все элементы можно считать идеальными, известные параметры элементов указаны на рисунке, неизвестная ЭДС больше  $\mathcal{E}$ . Ключ замыкают и ждут установления стационарного режима. Затем ключ размыкают, после чего в схеме выделяется количество теплоты, равное  $\frac{1}{72}C\mathcal{E}^2$ .

1) Какое количество теплоты выделилось в резисторе  $4R$  после размыкания ключа?

2) Найдите силу тока, протекавшего в схеме в стационарном режиме.

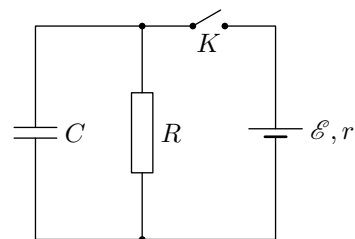


$$\frac{\partial Q}{\partial \mathcal{E}} = I \left( r + \frac{\partial Q}{\partial I} \right) = \mathcal{E} \frac{\partial I}{\partial \mathcal{E}} \quad (1)$$

Задача 31. (МФТИ, 2008) Электрическая цепь состоит из батарейки с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ , конденсатора ёмкостью  $C$  и резистора сопротивлением  $R = 4r$  (см. рисунок). Ключ  $K$  на некоторое время замыкают, а затем размыкают. После размыкания ключа в схеме выделилось количество теплоты  $Q$ .

1) Найдите ток, текущий через источник непосредственно перед размыканием ключа.

2) Найдите ток, текущий через конденсатор в этот же момент.

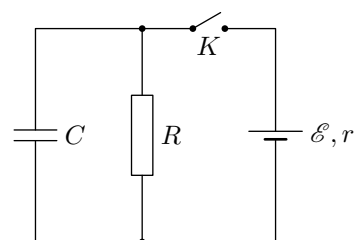


$$\frac{\partial Q}{\partial \mathcal{E}} \Big|_{\mathcal{E}=\mathcal{E}_0} - \frac{Q}{\mathcal{E}_0} = \mathcal{E}_0 I \left( r + \frac{\partial Q}{\partial I} \right) \Big|_{\mathcal{E}=\mathcal{E}_0} - \frac{Q}{\mathcal{E}_0} = \mathcal{E}_0 I \quad (1)$$

Задача 32. (МФТИ, 2008) Электрическая цепь состоит из батарейки с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ , конденсатора ёмкостью  $C$  и резистора сопротивлением  $R = 5r$  (см. рисунок). Ключ  $K$  замыкают, а затем размыкают в момент, когда токи через конденсатор и резистор сравниваются по величине.

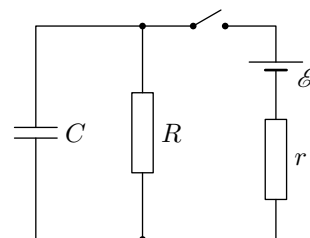
1) Какую мгновенную мощность развивает источник непосредственно перед размыканием ключа?

2) Какое количество теплоты выделится в схеме после замыкания ключа?



$$\mathcal{E} \frac{\partial P}{\partial \mathcal{E}} \Big|_{\mathcal{E}=\mathcal{E}_0} = \mathcal{E}_0 \left( r + \frac{\partial Q}{\partial \mathcal{E}} \right) \Big|_{\mathcal{E}=\mathcal{E}_0} = \mathcal{E}_0 I \quad (1)$$

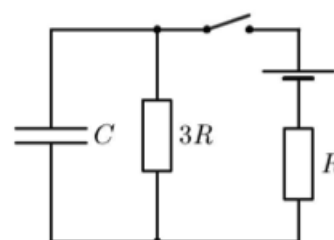
Задача 33. («Физтех», 2011) В схеме, показанной на рисунке, все элементы можно считать идеальными, параметры элементов указаны на рисунке. До замыкания ключа ток в цепи отсутствовал. Ключ замыкают на некоторое время, а затем размыкают. Оказалось, что величина тока через конденсатор непосредственно перед размыканием ключа в три раза больше, чем сразу после размыкания.



- 1) Найдите ток через конденсатор сразу после замыкания ключа.
- 2) Найдите напряжение на конденсаторе сразу после размыкания ключа.
- 3) Какое количество теплоты выделилось в цепи после размыкания ключа?

$$\left(\frac{4r+R}{rR}\right) \frac{\varepsilon}{C} = \varnothing (\varepsilon ; \frac{4r+R}{rR} = \varnothing \Omega (\tau ; \frac{r}{R} = \varnothing \Omega I$$

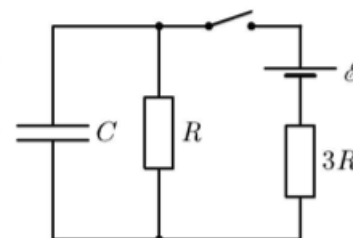
Задача 34. («Физтех», 2015, 11) В электрической цепи, схема которой показана на рисунке, все элементы идеальные, их параметры указаны. До замыкания ключа ток в цепи отсутствовал. Ключ на некоторое время замыкают, а затем размыкают. Сразу после замыкания ключа ток через конденсатор равен  $I_0$ . Сразу после размыкания ключа ток через конденсатор равен  $I_0/5$ .



- 1) Найдите ЭДС источника.
- 2) Найдите количество теплоты, которое выделится в цепи после размыкания ключа.
- 3) Найдите ток, текущий через источник непосредственно перед размыканием ключа.

$$I_0 \frac{\varepsilon}{2} = I (\varepsilon ; 5I_0 \frac{\varepsilon}{6} = \varnothing (\tau ; 5I_0 = \varnothing I$$

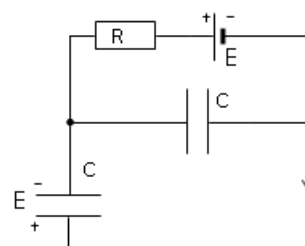
Задача 35. («Физтех», 2015, 11) В электрической цепи, схема которой показана на рисунке, все элементы идеальные, их параметры указаны. До замыкания ключа ток в цепи отсутствовал. Ключ на некоторое время замыкают, а затем размыкают. За время, пока ключ был замкнут, через резистор  $R$  протёк заряд  $q_0$ . После размыкания ключа через тот же резистор протёк заряд  $q_0/2$ .



- 1) Найдите ток через источник сразу после замыкания ключа.
- 2) Найдите количество теплоты, которое выделилось в цепи после размыкания ключа.
- 3) Найдите количество теплоты, которое выделилось в цепи при замкнутом ключе.

$$\frac{\varnothing \varepsilon}{\varnothing b} - \varnothing \varnothing \frac{\varepsilon}{\varepsilon} = \tau \varnothing (\varepsilon ; \frac{\varnothing \varepsilon}{\varnothing b} = \tau \varnothing (\tau ; \frac{5\varepsilon}{\varnothing} = \varnothing I$$

Задача 36. («Физтех», 2014, 11) Определите количество теплоты, которое выделится на резисторе после замыкания ключа. Изначально конденсатор в ветви ключа заряжен до напряжения  $E$  в полярности, указанной на рисунке. ЭДС источника  $E = 50$  В. Ёмкости  $C = 10$  мкФ. Источник идеальный.



$$25 \text{ мДж}$$

## 2 «Курчатов»

ЗАДАЧА 37. («Курчатов», 2014, 10) Плоский конденсатор ёмкостью  $C = 22$  пФ, резистор с сопротивлением  $R = 10$  МОм и идеальный источник напряжения номиналом  $U = 100$  В соединены последовательно. Расстояние между обкладками быстро уменьшают в  $n = 2$  раза. Найдите тепло  $Q$ , которое выделится после этого на резисторе.

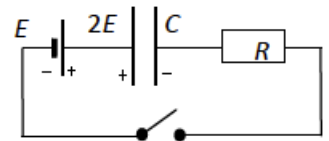
$$Q = \frac{U^2 C}{2} \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) = 0$$

## 3 Всероссийская олимпиада школьников по физике

ЗАДАЧА 38. (Всеросс., 2018, ШЭ, 11) Всё пространство между обкладками плоского конденсатора занимает непроводящая пластина с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2$ . Этот конденсатор через резистор с большим сопротивлением подключён к батарее с ЭДС  $\mathcal{E} = 100$  В. Пластину быстро вынимают так, что заряды пластин конденсатора за время удаления пластины не успевают измениться. Определите, какую минимальную работу необходимо совершить для такого удаления пластины. Какое количество теплоты выделится в цепи к моменту, когда система придёт в новое равновесное состояние? Электрическая ёмкость незаполненного конденсатора  $C_0 = 100$  мкФ.

$$W = \frac{C_0 \mathcal{E}^2}{2} \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon} \right) = 0; \quad Q = \frac{C_0 \mathcal{E}^2}{2} \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon} \right) = 0$$

ЗАДАЧА 39. (Всеросс., 2017, МЭ, 11) Электрическая цепь состоит из соединённых последовательно идеального источника напряжения с ЭДС  $\mathcal{E} = 12$  В, резистора, разомкнутого ключа и заряженного до напряжения  $2\mathcal{E}$  конденсатора (полярность указана на схеме). Ключ замыкают. Определите напряжение  $U$  на конденсаторе в тот момент, когда количество теплоты, выделившееся в резисторе, окажется в 3 раза меньше энергии, оставшейся в конденсаторе.

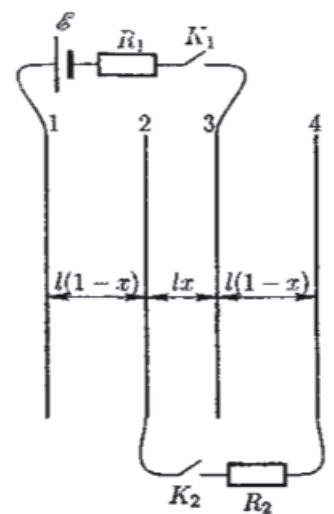


$$U = \frac{\mathcal{E}}{3} = 4 \text{ В}$$

ЗАДАЧА 40. (Всеросс., 2006, ОЭ, 10) Четыре пластины 1, 2, 3 и 4 площадью  $S$  расположены параллельно друг другу на расстояниях  $(1-x)l$ ,  $xl$  и  $(1-x)l$ , малых по сравнению с размерами пластин (рис.). К пластинам 1 и 3 подключена батарейка с ЭДС  $\mathcal{E}$ , резистор  $R_1$  и ключ  $K_1$ , к пластинам 2 и 4 — ключ  $K_2$  и резистор  $R_2$ . В начальный момент времени ключи разомкнуты, пластины не заряжены.

1) Ключ  $K_1$  замыкают. Какими будут заряды на пластинах после установления равновесия? Какое количество теплоты  $Q_0$  выделится на резисторе  $R_1$ ?

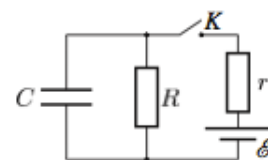
2) После установления равновесия замыкают ключ  $K_2$ . Найдите установившиеся заряды на пластинах и суммарное количество теплоты  $Q$ , которое выделится на резисторах  $R_1$  и  $R_2$  после замыкания ключа  $K_2$ .



$$\frac{1}{2} \frac{\mathcal{E}^2}{R_1} \frac{x^2 - 1}{x^2} = 0; \quad \frac{1}{2} \frac{\mathcal{E}^2 (x^2 - 1)}{R_1 S^2 x^2} = 0; \quad \frac{1}{2} \frac{\mathcal{E}^2 (x^2 - 1)}{R_2 S^2 x^2} = 0; \quad \left( \frac{1}{2} \frac{\mathcal{E}^2}{R_2 S^2 x^2} = 0 \right) \Rightarrow \frac{1}{2} \frac{\mathcal{E}^2}{R_2 S^2 x^2} = 0$$

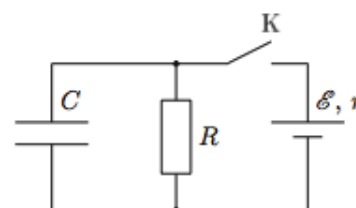
ЗАДАЧА 41. (Всеросс., 2010, РЭ, 11) Электрическая схема (см. рисунок) состоит из источника постоянного тока с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ , конденсатора ёмкостью  $C$  и резистора  $R$ . В начальный момент конденсатор не заряжен.

Ключ  $K$  в схеме сначала замыкают, а затем размыкают в тот момент, когда скорость изменения энергии, запасённой в конденсаторе, достигает максимума. Какое количество теплоты выделится в схеме после размыкания ключа?



$$\int_0^{\infty} \left( \frac{dW}{dt} \right) dt = 0$$

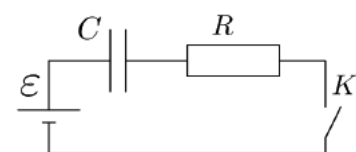
ЗАДАЧА 42. (Всеросс., 2013, РЭ, 11) Электрическая цепь (см. рисунок) состоит из конденсатора ёмкостью  $C = 125 \mu\text{Ф}$ , резистора  $R$ , сопротивление которого неизвестно, источника постоянного тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 70 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $r = R/2$ . Вначале конденсатор не заряжен, ток отсутствует. Ключ  $K$  замыкают и через некоторое время размыкают. Оказалось, что сразу после размыкания ключа сила тока, текущего через конденсатор, в два раза больше силы тока, текущего через конденсатор непосредственно перед размыканием ключа. Найдите количество теплоты, которое выделилось в цепи после размыкания ключа  $K$ .



$$\int_0^{\infty} I^2 r dt = \int_0^{\infty} I^2 C dt = 0$$

ЗАДАЧА 43. (Всеросс., 2017, РЭ, 11) В электрической цепи (рис.) все элементы можно считать идеальными. Конденсатор ёмкостью  $C$  не заряжен. ЭДС батареи задана. Ключ  $K$  замыкают, а затем размыкают в тот момент, когда скорость изменения энергии, запасённой в конденсаторе, составляет 75% от максимальной.

Найдите количество теплоты, выделившееся в цепи при замыкании ключа.



$$\int_0^{\infty} I^2 R dt = \int_0^{\infty} I^2 C dt = 0$$

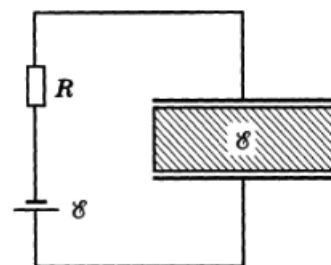
ЗАДАЧА 44. (Всеросс., 1998, финал, 10) В воздушный конденсатор ёмкости  $C_0$  вставлена пластина с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ . Диэлектрик заполняет весь объём конденсатора. Конденсатор подключён к батарее с ЭДС  $\mathcal{E}$  через резистор  $R$  (рис.). Пластину быстро вынимают из конденсатора, так что его начальный заряд не успевает измениться. После этого начинается процесс перезарядки конденсатора. Найдите:

1) механическую работу, совершаемую внешней силой против сил электрического поля при извлечении пластины из конденсатора;

2) изменение электрической энергии конденсатора в процессе перезарядки;

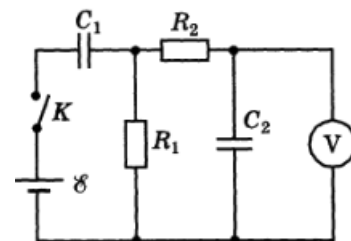
3) работу батареи;

4) количество теплоты, выделившееся на резисторе  $R$ .



$$\int_0^{\infty} I^2 R dt = \int_0^{\infty} I^2 C dt = 0$$

ЗАДАЧА 45. (Всеросс., 1999, финал, 10) На рисунке представлена электрическая цепь, состоящая из батареи с ЭДС  $\mathcal{E}$ , конденсаторов ёмкостями  $C_1$  и  $C_2$ , резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , ключа  $K$  и идеального вольтметра  $V$ . После замыкания ключа  $K$  оказалось, что в некоторый момент времени максимальное напряжение на конденсаторе  $C_2$ , измеренное вольтметром, равно  $\mathcal{E}/2$ .



1) Определите разность потенциалов на конденсаторе  $C_1$  в этот момент.

2) Найдите силу тока через резистор  $R_1$  в этот же момент.

3) Определите максимальный заряд на конденсаторе  $C_1$ .

4) Вычислите полное количество теплоты, выделившееся в цепи после замыкания ключа  $K$ .

$$\frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{C_2}{C_1} = \frac{1}{2} \Rightarrow C_2 = \frac{1}{2} C_1$$

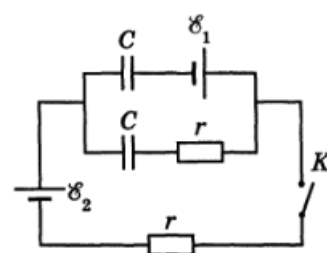
ЗАДАЧА 46. (Всеросс., 2000, финал, 10) В электрической цепи, представленной на рисунке, ключ  $K$  разомкнут и токи не текут. Определите:

1) силы токов, протекающих через батареи  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  сразу после замыкания ключа  $K$ ;

2) изменение электростатической энергии  $\Delta W$  системы после прекращения токов;

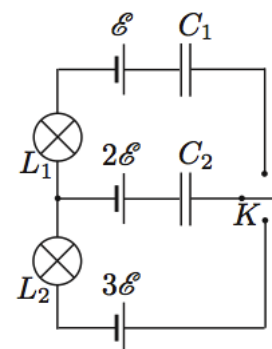
3) работы  $A_1$  и  $A_2$  батарей  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  за всё время процесса;

4) количество теплоты  $Q$ , выделившееся на резисторах после замыкания ключа  $K$ .



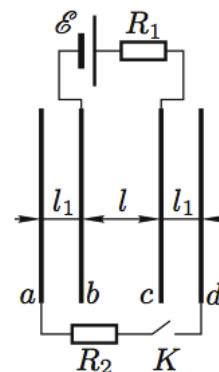
$$\frac{C}{C + \frac{r}{\mathcal{E}_1}} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{C}{C + \frac{r}{\mathcal{E}_1}} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{2C}{2C + \frac{r}{\mathcal{E}_1}} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{4C}{2C + \frac{r}{\mathcal{E}_1}} = 1 \Rightarrow 4C = 2C + \frac{r}{\mathcal{E}_1} \Rightarrow 2C = \frac{r}{\mathcal{E}_1} \Rightarrow C = \frac{r}{2\mathcal{E}_1}$$

ЗАДАЧА 47. (Всеросс., 2003, финал, 10) В цепи (рис.) переключатель  $K$  находится в среднем (разомкнутом) положении, а конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  одинаковой ёмкости  $C$  не заряжены. В некоторый момент переключатель замыкают в одно из положений. После установления равновесия в цепи его перебрасывают в противоположное положение. Найдите отношение  $Q_{L_1}/Q_{L_2}$  теплот, выделившихся на лампах накаливания  $L_1$  и  $L_2$  после многократного повторения переключений. Источники тока с ЭДС  $\mathcal{E}$ ,  $2\mathcal{E}$  и  $3\mathcal{E}$  считать идеальными.



$$\frac{\mathcal{E}}{2} \text{ или } \frac{1}{8}$$

ЗАДАЧА 48. (Всеросс., 2008, финал, 10) Сложный конденсатор состоит из четырёх одинаковых пластин площадью  $S = 1 \text{ м}^2$  каждая, расположенных параллельно друг другу (рис.). Расстояние между средними пластинами  $b$  и  $c$  равно  $l = 2 \text{ см}$ . Расстояние между пластинами  $a$  и  $b$ ,  $c$  и  $d$  равно  $l_1 = l/2$ . Пластины  $b$  и  $c$  подключены к идеальному источнику напряжения с  $\mathcal{E} = 120 \text{ В}$  через резистор  $R_1$ . В начальном состоянии ключ  $K$  разомкнут.



1) Нарисуйте эквивалентную схему сложного конденсатора после замыкания ключа  $K$  и найдите его ёмкость  $C$ .

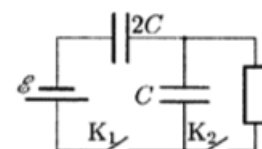
2) Какое количество теплоты  $Q$  выделится на резисторах  $R_1$  и  $R_2$  (в сумме) при замыкании ключа  $K$ ?

Электрическая постоянная  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ .

Указание. Воспользуйтесь законом сохранения энергии.

$$\text{жГЛЖЛ } \tau' \mathcal{E} = \frac{\tau \mathcal{E}}{\mathcal{E} S^0 \mathcal{E}} = \partial (\tau ; \Phi \text{ н } 68'0 = \frac{l}{\mathcal{E} S^0 \mathcal{E}} = \mathcal{C} (1$$

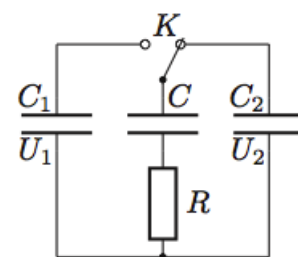
ЗАДАЧА 49. (Всеросс., 2010, финал, 10) 1) В электрической цепи, состоящей из аккумулятора с ЭДС  $\mathcal{E}$ , двух конденсаторов с ёмкостями  $2C$  и  $C$  и резистора с некоторым сопротивлением (рис.), замыкают ключ  $K_1$ . До какого напряжения зарядятся конденсаторы? Внутренним сопротивлением аккумулятора пренебрегите.



2) После того как конденсаторы полностью зарядились, замыкают ключ  $K_2$  и размыкают его тогда, когда сила тока через аккумулятор уменьшается в два раза по сравнению с силой тока через него сразу после замыкания ключа  $K_2$ . Найдите количество теплоты  $Q$ , выделившееся в цепи за время, прошедшее с момента замыкания ключа  $K_2$  до момента его размыкания.

$$\tau \mathcal{C} \mathcal{E} = \partial (\tau ; \mathcal{E} = \tau \mathcal{E} ; \mathcal{E} = \tau \mathcal{E} = \tau \mathcal{E} (1$$

ЗАДАЧА 50. (Всеросс., 2011, финал, 10) Имеются два заряженных конденсатора с ёмкостями  $C_1 = 18 \text{ мкФ}$  и  $C_2 = 19 \text{ мкФ}$ . Напряжения на конденсаторах равны соответственно  $U_1 = 76 \text{ В}$  и  $U_2 = 190 \text{ В}$ . Третий конденсатор с неизвестной ёмкостью  $C$  подсоединён к конденсатору  $C_2$  (рис.). Ключ  $K$  перекидывают из правого положения в левое, а после перезарядки конденсаторов возвращают в исходное положение.

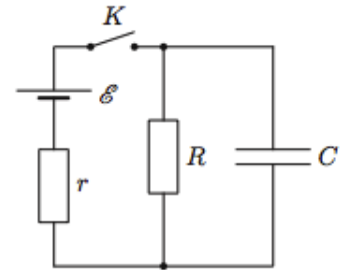


Известно, что после выполнения 44 таких циклов разность напряжений  $(U_2 - U_1)_{44}$  составила 1% от первоначальной  $(U_2 - U_1)_0$ .

- 1) Чему равна ёмкость конденсатора  $C$ ?
- 2) Какое напряжение  $U_\infty$  установится на конденсаторах после большого числа циклов?
- 3) Какая тепловая энергия выделится на резисторе  $R$  после большого числа циклов?

$$\text{жГЛЖЛ } \tau 9 = U, U^\infty = 136 \text{ В}, U = 62 \text{ мДж } C = 1 \text{ мкФ}$$

ЗАДАЧА 51. (*Всеросс., 2013, финал, 10*) В схеме (см. рисунок) все элементы можно считать идеальными. ЭДС источника  $\mathcal{E} = 4,0$  В, сопротивления резисторов  $r = 50$  кОм,  $R = 150$  кОм, ёмкость конденсатора  $C = 2,0$  мФ. До замыкания ключа ток в цепи отсутствовал. Ключ замыкают на некоторое время, а затем размыкают. За время, пока ключ был замкнут, в схеме выделилось количество теплоты  $Q_1 = 7,43$  мДж, а после размыкания ключа в схеме выделилось количество теплоты  $Q_2 = 1,00$  мДж.

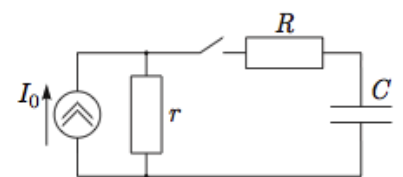


1) Какой заряд протёк через резистор  $R$ , пока ключ был замкнут?

2) На какое время замкнули ключ?

$$Q = \frac{\mathcal{E}^2 C}{2(r+R)} = 1,00 \text{ мДж} \quad (1)$$

ЗАДАЧА 52. (*Всеросс., 2014, финал, 10*) Стабилизированный источник тока способен выдавать постоянный ток  $I_0$  независимо от подключённой к нему нагрузки. Источник включён в цепь, показанную на рисунке. Все элементы цепи можно считать идеальными, их параметры указаны на рисунке. До замыкания ключа конденсатор не был заряжен. В некоторый момент времени ключ замкнули. Какое количество теплоты  $Q$  выделилось на резисторе  $R$  после замыкания ключа?

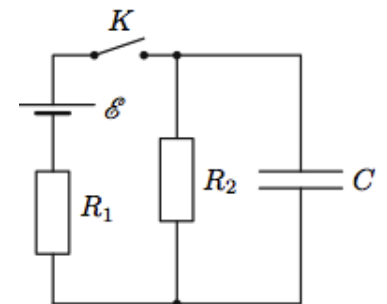


$$Q = \frac{C R I_0^2 r^2}{2(r+R)} = 0$$

ЗАДАЧА 53. (*Всеросс., 2016, финал, 10*) В электрической цепи (см. рисунок) все элементы можно считать идеальными. Вначале конденсатор ёмкостью  $C$  не заряжен. Ключ  $K$  замыкают, а затем, когда скорость изменения энергии в конденсаторе достигает максимума — размыкают.

1) Найдите мощность  $N$ , которую развил источник постоянного напряжения к моменту размыкания ключа.

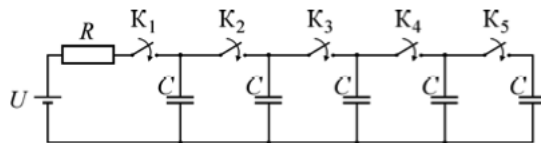
2) Пусть сопротивления резисторов равны  $R_1 = R_2 = R$ . В этом случае скорость изменения энергии в конденсаторе достигает максимума через время  $t_0 = CR \ln \sqrt{2}$  (это время можно найти, решая соответствующее дифференциальное уравнение, которое вам решать не нужно). Определите количество теплоты  $Q$ , которое выделится в цепи при замкнутом ключе  $K$ .



$$N = \frac{\mathcal{E}^2}{2R_1 + R_2} = 1 \text{ Вт} \quad (1)$$

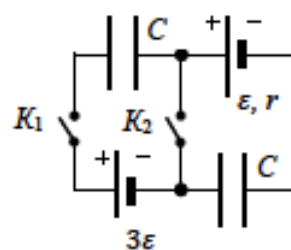
## 4 Московская олимпиада школьников по физике

Задача 54. (МОШ, 2014, 10) В цепи, схема которой изображена на рисунке, по очереди замыкают ключи  $K_1 - K_5$ , выжидая каждый раз достаточно длительное время до окончания процессов зарядки конденсаторов. Во сколько раз отличаются количества теплоты, выделившиеся в резисторе  $R$  после замыкания ключа  $K_1$  и ключа  $K_5$ ? До его замыкания все остальные ключи уже были замкнуты. Сопротивления всех проводов и источника тока пренебрежимо малы.



В 5 раз

Задача 55. (МОШ, 2017, 11) В электрической цепи, схема которой приведена на рисунке, изначально ключи разомкнуты, а конденсаторы не заряжены.  $C = 1$  мкФ,  $\mathcal{E} = 2$  В.



1) Определите напряжения на конденсаторах через большое время после замыкания ключа  $K_1$ .

2) Определите количество теплоты  $Q$ , которое выделится на внутреннем сопротивлении источника  $\mathcal{E}$ , если через большое время после замыкания ключа  $K_1$  замкнуть ключ  $K_2$ .

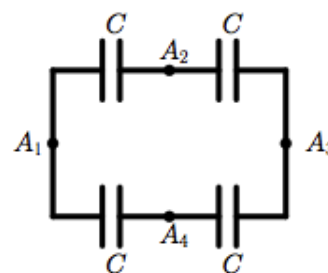
3) Определите разность потенциалов на контактах ключа  $K_2$  перед его замыканием.

4) Определите величину заряда, протекшего через ключ  $K_2$  после его замыкания.

Внутренним сопротивлением источника  $3\mathcal{E}$  можно пренебречь.

1)  $U_1 = U_2 = \mathcal{E} = 2$  В; 2)  $Q = 2C\mathcal{E}^2 = 8$  мкДж; 3)  $U = 3\mathcal{E} = 6$  В; 4)  $q = 4C\mathcal{E} = 8$  мкКл

Задача 56. (МОШ, 2015, 11) На рисунке изображена схема электрической цепи, составленной из четырёх первоначально незаряженных конденсаторов ёмкости  $C$ . Сначала к точкам  $A_1$  и  $A_3$  подключили батарейку с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ . Когда ток через батарейку стал пренебрежимо малым, батарейку отключили, а к точкам  $A_1$  и  $A_2$  подключили резистор  $R$ , который также отключили, когда ток через него стал пренебрежимо мал. Найдите электрические заряды на каждой из пластин конденсаторов:



(а) после отключения батарейки;

(б) после отключения резистора.

(в) Каким был максимальный электрический ток через резистор в данном процессе?

(г) Какое количество теплоты выделилось на резисторе?

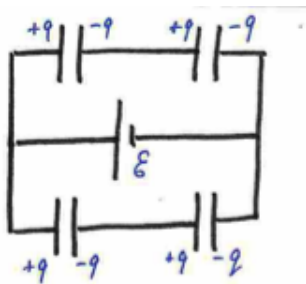
Получите ответы в виде общих формул и в частном случае  $\mathcal{E} = 6$  В,  $r = 1$  Ом,  $C = 1$  мФ,  $R = 1$  кОм.

См. конец листка

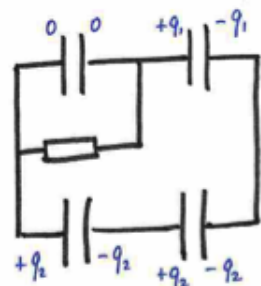


**Ответ к задаче 56**

(а)  $q = C\mathcal{E}/2 = 3$  мкКл (см. рисунок).



(б)  $q_1 = 2C\mathcal{E}/3 = 4$  мкКл,  $q_2 = C\mathcal{E}/3 = 2$  мкКл (см. рисунок).



(в)  $I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{2R} = 3$  мА.

(г)  $Q = \frac{C\mathcal{E}^2}{6} = 6$  мДж.