

# Исследование электрических цепей с конденсаторами

Л. Э. Генденштейн

По материалам УМК

Л. Э. Генденштейна, А. А. Булатовой,  
И. Н. Корнильева, А. В. Кошкиной



# Какова педагогическая цель задачи по физике?

Многолетний опыт показывает, что *решение задач* — *неэффективный способ обучения решению задач*, как это ни парадоксально. Результат говорит сам за себя: 95 % выпускников не научаются за 5 лет обучения физике решать задачи, а те 5 %, которые решают, обучены часто не на уроках, а на репетиторских занятиях. Да к тому же они часто не «обучены», а *натасканы* (когда решения задач заучивают вместе с условиями).

Основная причина такого грустного положения в том, что традиционная задача (с уже поставленным вопросом: такие задания называют иногда «закрытыми») — это инструмент *контроля*, а не обучения (в том числе — обучения решению задач).

# Какова педагогическая цель задачи?

Получить правильный ответ? Но ведь он уже известен тому, кто задаёт задачу. Такая цель обоснована только при *контроле* (*контрольная* работа или экзамен). Однако, к сожалению, получение правильного ответа является часто целью и при *обучении* решению задач.

Что же проверяют традиционные задачи, если они являются средством контроля? Они проверяют умение *исследовать* ситуацию, описанную в условии. Ответ на поставленный вопрос — всего лишь один из результатов этого исследования, причём далеко не всегда самый интересный и поучительный.

Значит, надо учить ребят *исследовать* — а это значит: учить их *ставить задачи*. А для этого надо предложить им объекты исследования и научить их исследовательскому подходу.

Объектами исследования в нашем методе являются ключевые ситуации, лежащие в основе подавляющего большинства задач. А предлагаемый метод — МИКС (метод исследования ключевых ситуаций).

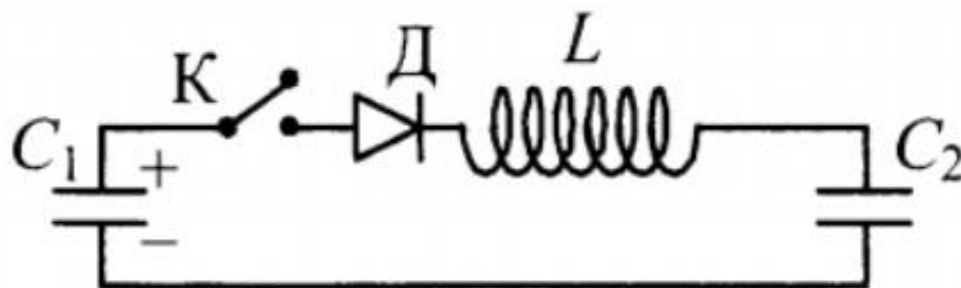
Чтобы заинтересовать в исследовании ситуации учеников, «заточенных» на получение правильного ответа на уже поставленный вопрос, можно начинать с задачи, переходя к *исследованию* ситуации различными способами.

Мы рассмотрим способы *упрощения* описанной в условии ситуации и *усложнения* этой ситуации. Оба способа являются моделями настоящей исследовательской деятельности.

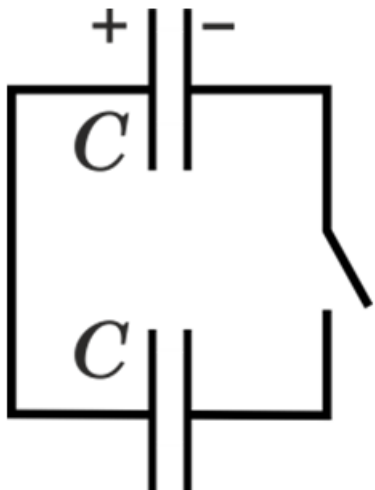
# Упрощение ситуации

Рассмотрим одну из довольно трудных задач ЕГЭ, которую решили немногие выпускники:

К конденсатору  $C_1$  через диод и катушку индуктивности  $L$  подключен конденсатор емкостью  $C_2 = 2 \text{ мкФ}$ . До замыкания ключа  $K$  конденсатор  $C_1$  был заряжен до напряжения  $U = 50 \text{ В}$ , а конденсатор  $C_2$  не заряжен. После замыкания ключа система перешла в новое состояние равновесия, в котором напряжение на конденсаторе  $C_2$  оказалось равным  $U_2 = 20 \text{ В}$ . Какова емкость конденсатора  $C_1$ ? (Активное сопротивление цепи пренебрежимо мало.)



Максимально упрощаем ситуацию: оставляем только два конденсатора, причём *одинаковых*. Один заряжен.

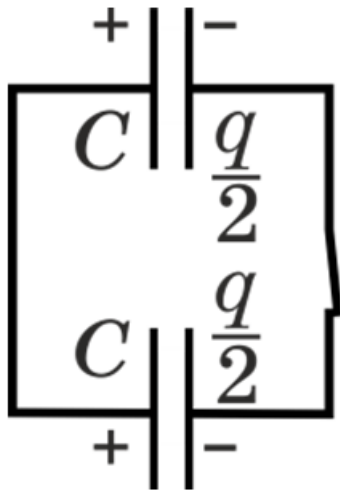


Почему нижний конденсатор не заряжается от верхнего при разомкнутом ключе?

Что происходит при замыкании ключа?

**Предполагаем, что потерями энергии вследствие излучения и нагревания можно пренебречь.**

Заряд распределился между конденсаторами поровну.



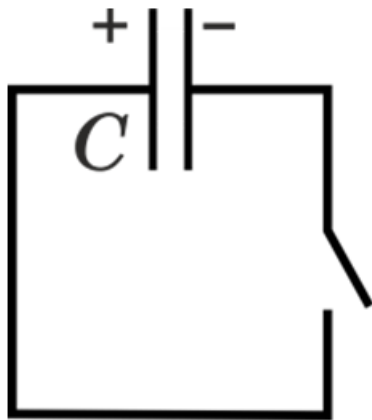
Как изменилась энергия  
электрического поля в конденсаторах?

$$W_1 = \frac{q^2}{2C}$$

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

Куда «пропала» *половина* энергии?

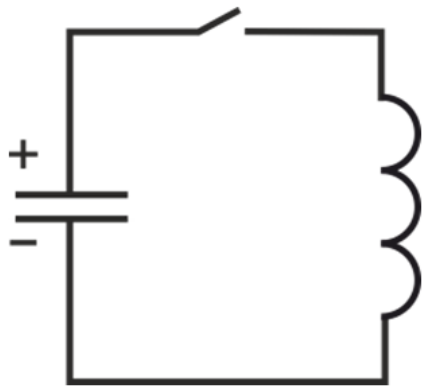
Чтобы ответить на этот вопрос, попробуем ещё больше упростить ситуацию. Как?



При замыкании ключа «пропадает»  
*вся* энергия заряженного конденсатора!

Вывод: предположение, что  
потерями энергии вследствие излучения  
и нагревания можно пренебречь, **некорректно**.





Надо добавить резервуар для энергии — резистор или катушку.  
Добавим в этот раз катушку.

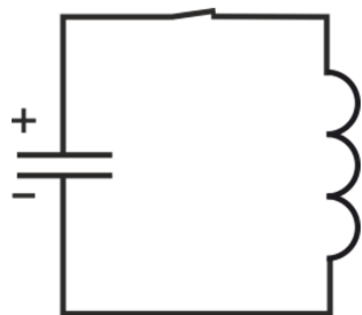
Получили уже знакомый колебательный контур. После замыкания ключа начнутся электромагнитные колебания. Благодаря катушке энергия остаётся в системе!

До каких пор ток будет течь в одном направлении?  
Чем это определяется?

Теперь для ответа на этот вопрос можно пренебречь потерями энергии на излучение и нагревание и использовать закон сохранения энергии:

$$\frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}$$

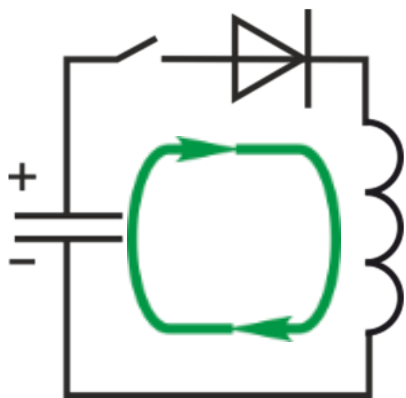
Отсюда следует, что в момент, когда  $I$  станет равным нулю, произойдёт *полная* перезарядка конденсатора.



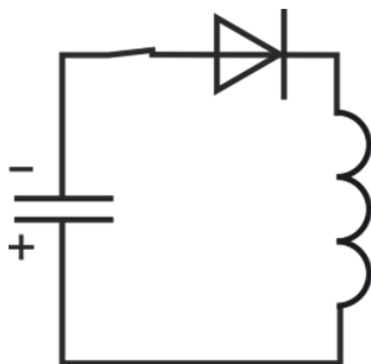
В какой момент сила тока максимальна?

$$\frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}$$

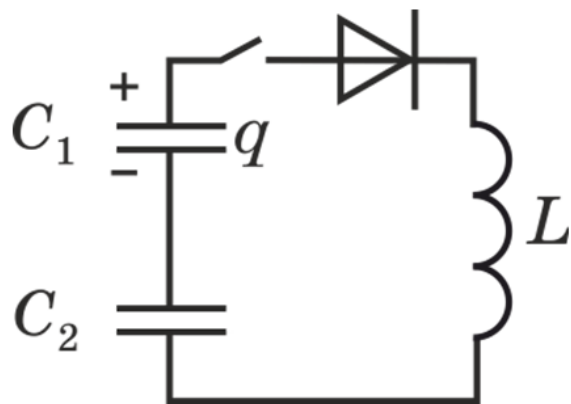
Когда заряд конденсатора равен нулю.



Добавим диод.



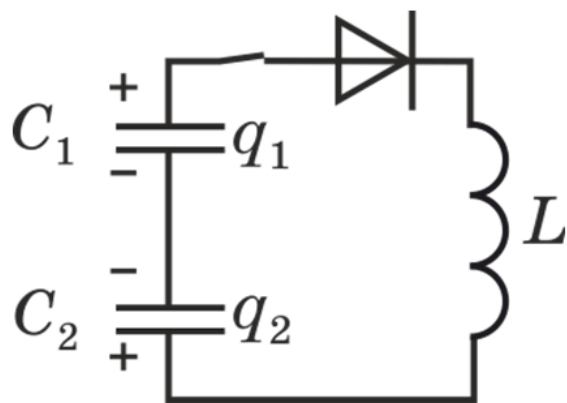
Ток будет течь только по часовой стрелке.  
 Произойдёт *полная* перезарядка конденсатора  
 (мы это уже доказали), и на этом всё закончится.



Добавляем второй конденсатор.

До каких пор ток будет течь  
в одном направлении?  
Чем это определяется?

Когда  $I = 0$ , суммарная энергия конденсаторов равна начальной энергии заряженного конденсатора.

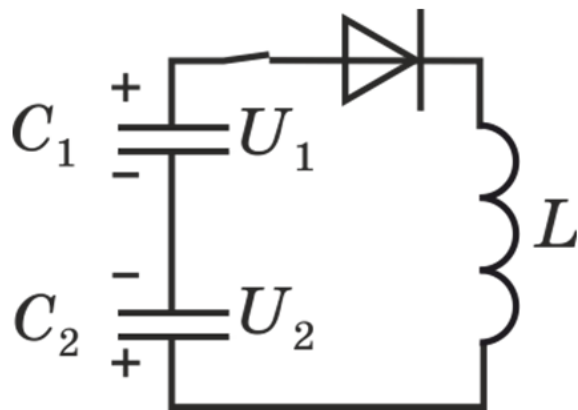


$$\frac{q_1^2}{2C_1} + \frac{q_2^2}{2C_2} = \frac{q^2}{2C_1}$$

$$q_1 + q_2 = q$$

Два уравнения: можно найти два неизвестных.

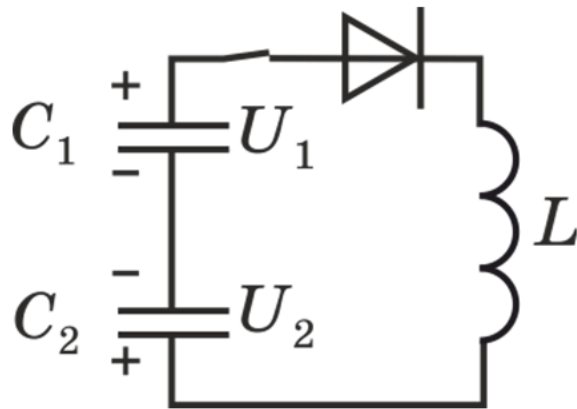
Можно переписать для напряжений и ёмкостей:



$$\frac{C_1 U_1^2}{2} + \frac{C_2 U_2^2}{2} = \frac{C_1 U^2}{2}$$

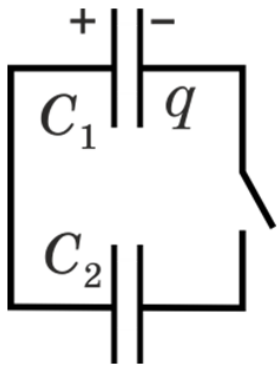
$$\frac{U_1}{C_1} + \frac{U_2}{C_2} = \frac{U}{C_1}$$

Два уравнения: можно найти два неизвестных.

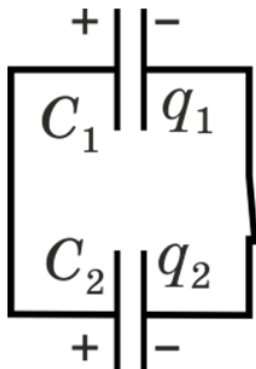


В какой момент сила тока максимальна?  
Чему она равна?

Давайте снова упростим:  
уберём на время катушку.



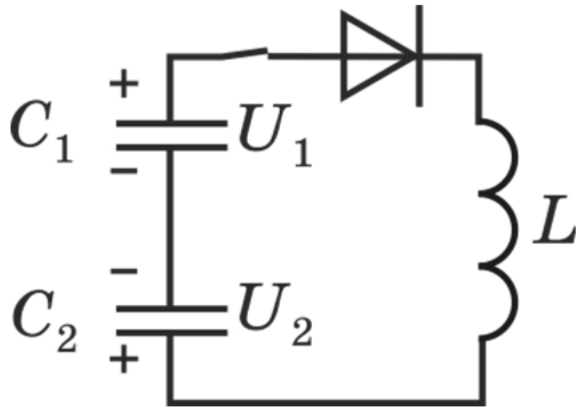
После замыкания ключа потенциалы левых пластин конденсаторов станут равны друг другу, то же справедливо и для правых пластин. Поэтому напряжения на конденсаторах станут равными:



$$U_1 = U_2 \Rightarrow \frac{q_1}{C_1} = \frac{q_2}{C_2}$$

$$q_1 + q_2 = q$$

При наличии катушки именно в этот момент сила тока максимальна (аналог полной разрядки конденсатора в обычном колебательном контуре).



$$U_1 = U_2 \Rightarrow \frac{q_1}{C_1} = \frac{q_2}{C_2}$$

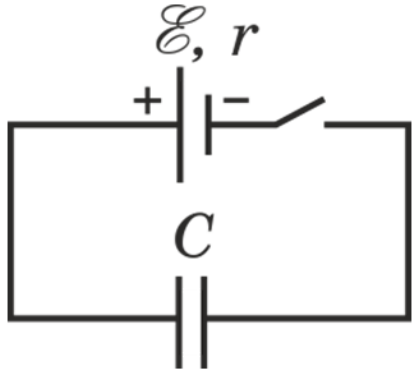
$$q_1 + q_2 = q$$

Из закона сохранения энергии:

$$\frac{q_1^2}{2C_1} + \frac{q_2^2}{2C_2} = \frac{LI_{\max}^2}{2}$$

Получили три уравнения, из которых можно узнать 3 величины: например,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $I_{\max}$ . Можно и любые другие три!

# Усложнение ситуации



Источник тока, ключ и конденсатор.

Что произойдёт после замыкания ключа?

Будут справедливы  
следующие соотношения:

$$U = \mathcal{E}$$

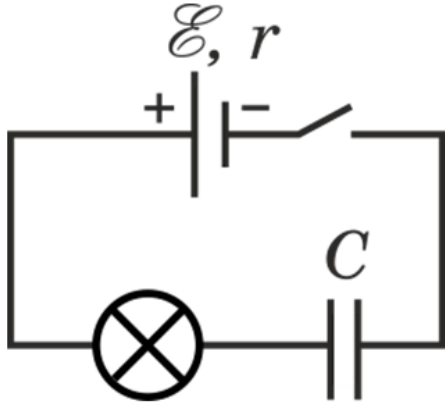
$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{C\mathcal{E}^2}{2}$$

$$A_{\text{ст. сил}} = q\mathcal{E} = CU\mathcal{E} = C\mathcal{E}^2$$

Опять половина энергии «пропала»!

Нужен резервуар для энергии — например, лампочка (она будет служить также наглядным индикатором тока). Хотя в данном случае резервуаром для энергии является и сам источник благодаря внутреннему сопротивлению.

Добавим лампочку.



$$U = \mathcal{E}$$

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{C\mathcal{E}^2}{2}$$

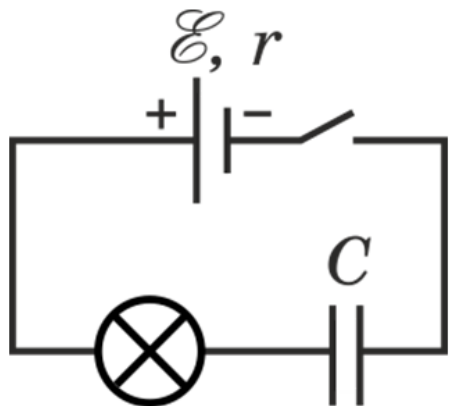
$$A_{\text{ст. сил}} = q\mathcal{E} = CU\mathcal{E} = C\mathcal{E}^2$$

В лампе и источнике выделятся

$$Q = A_{\text{ст. сил}} - W = \frac{C\mathcal{E}^2}{2}$$



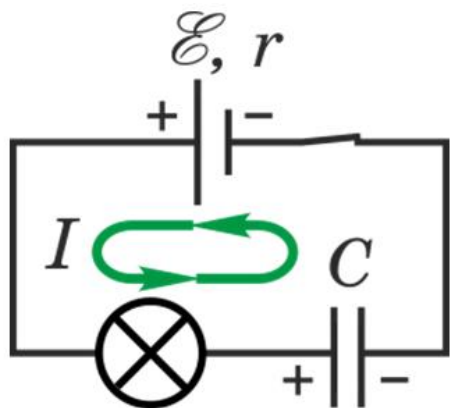
## Развиваем ситуацию.



После замыкания ключа *уменьшают* расстояние между обкладками конденсатора.

**Вспыхнет ли лампа?**

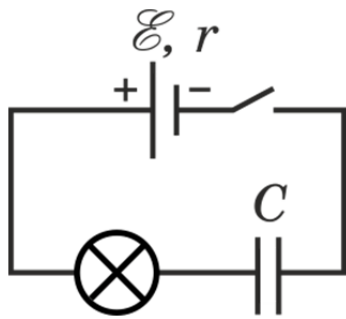
**Каким будет направление тока?**



Ёмкость конденсатора увеличится, поэтому при той же разности потенциалов его заряд *увеличится*. Значит, через лампу пройдёт ток, *увеличивающий* заряд конденсатора.

**Каков знак работы сторонних сил?**

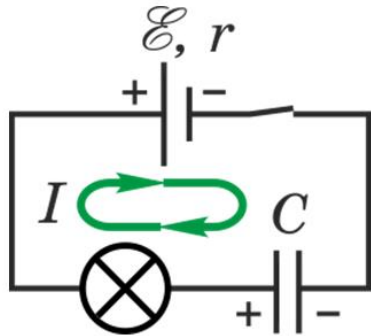
Во внешней цепи ток шёл от плюса к минусу источника — значит, работа сторонних сил *положительна* (обычный режим работы источника тока).



После замыкания ключа *увеличивают* расстояние между обкладками конденсатора.

**Вспыхнет ли лампа?**

**Каким будет направление тока?**



Ёмкость конденсатора уменьшится, поэтому его заряд *уменьшится*. Значит, через лампу пройдёт ток, *уменьшающий* заряд конденсатора.

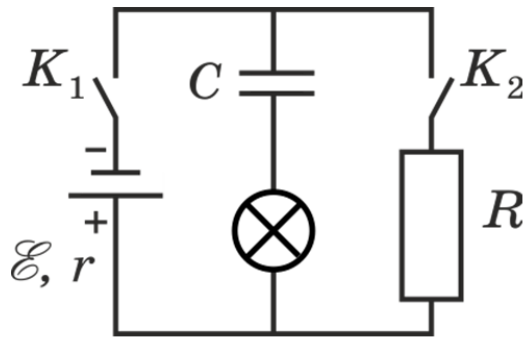
**Каков знак работы сторонних сил?**

Во внешней цепи ток шёл от минуса к плюсу источника — значит, работа сторонних сил *отрицательна* (энергия источника тока *увеличивается*: он работает в режиме зарядки аккумулятора).

Как объяснить то, что в этом случае выделяется энергия в лампе и вдобавок увеличивается энергия источника тока?

Мы совершили *положительную* работу, раздвигая *притягивающиеся* обкладки конденсатора.

# Развиваем ситуацию дальше.



Какие вопросы можно поставить?

Что произойдёт при замыкании  $K_1$ ?

В лампе и источнике выделится  $Q_1 = \frac{C\mathcal{E}^2}{2}$

Что произойдёт при *последующем* замыкании  $K_2$ ?

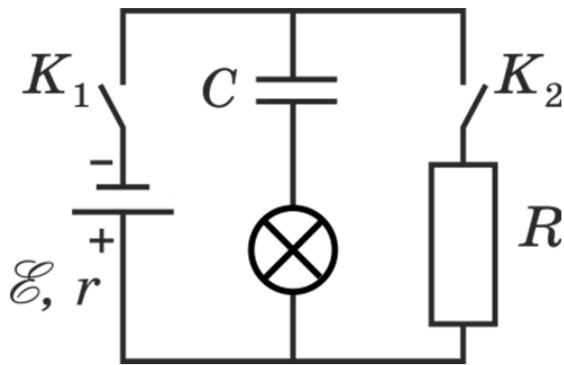
Напряжение на конденсаторе уменьшится — согласно закону Ома для полной цепи оно станет равным

$$U = IR = \mathcal{E} \frac{R}{R+r}$$

Следовательно, заряд конденсатора уменьшится на

$$\Delta q = C\mathcal{E} - CU = C\mathcal{E} \left( 1 - \frac{R}{R+r} \right) = C\mathcal{E} \frac{r}{R+r}$$

Вследствие частичной разрядки конденсатора лампа вспыхнет.



Что произойдёт при *последующем* замыкании  $K_1$ ?

Конденсатор разрядится через резистор и лампу.

$$Q_2 = W_2 = \frac{CU^2}{2} = \frac{C}{2} \left( \mathcal{E} \frac{R}{R+r} \right)^2 \quad Q_1 = \frac{C\mathcal{E}^2}{2}$$

$$U = IR = \mathcal{E} \frac{R}{R+r} \quad \Delta q = C\mathcal{E} \frac{r}{R+r}$$

Какие задачи можно поставить, используя эти соотношения?

Можно брать в качестве искоемых (неизвестных) величин любые величины, входящие в эти формулы.

11. На рисунке 43.6 показана схема электрической цепи. ЭДС источника тока  $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$ , его внутреннее сопротивление  $r = 2 \text{ Ом}$ , сопротивление резистора  $R = 1 \text{ Ом}$ , электроёмкость конденсатора  $C = 2 \text{ мкФ}$ . В начальном состоянии заряд конденсатора равен нулю.

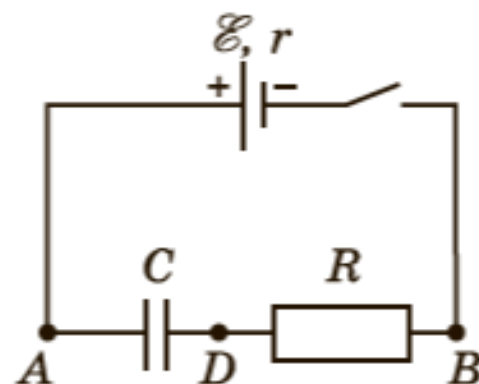


Рис. 43.6

- а) Чему равно напряжение между точками  $A$  и  $B$  при разомкнутом ключе?
- б) Чему равно напряжение между точками  $A$  и  $B$  при замкнутом ключе?
- в) Чему равно напряжение между точками  $B$  и  $D$  при замкнутом ключе?
- г) Чему равно напряжение между точками  $A$  и  $D$  при замкнутом ключе?
- д) Чему равен заряд конденсатора?
- е) Какие явления будут наблюдаться при замыкании и размыкании ключа, если резистор заменить лампочкой?

Похожие задачи

12. На рисунке 43.7 изображена схема электрической цепи, в которой  $\mathcal{E} = 24 \text{ В}$ ,  $r = 2 \text{ Ом}$ ,  $R = 10 \text{ Ом}$ ,  $C = 4 \text{ нФ}$ .

- а) Чему равно напряжение  $U$  между полюсами источника при замкнутом ключе?
- б) Чему равен заряд  $q$  конденсатора при замкнутом ключе?
- в) Какие явления будут наблюдаться при замыкании и размыкании ключа, если резистор заменить лампочкой?

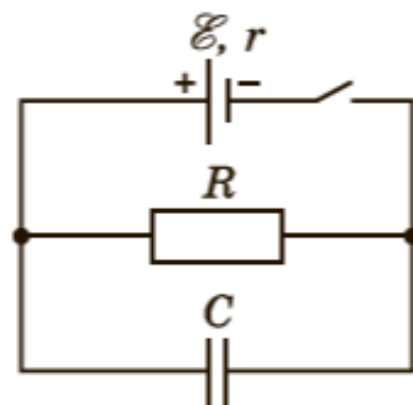


Рис. 43.7

13. На рисунке 43.8 изображена схема электрической цепи, в которой  $\mathcal{E} = 6 \text{ В}$ ,  $r = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_1 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 8 \text{ Ом}$ ,  $C = 8 \text{ мкФ}$ .

- а) Перечертите схему в тетрадь и обведите все элементы цепи, через которые будет течь ток.
- б) Чему равно сопротивление внешней цепи  $R$ ?
- в) Чему равно полное сопротивление цепи?
- г) Чему равна сила тока в резисторе 3?
- д) Чему равно напряжение между точками  $A$  и  $D$ ?
- е) Чему равно напряжение на конденсаторе?
- ж) Чему равен заряд конденсатора?
- з) Каков знак заряда обкладки конденсатора, соединённой с резистором 2?

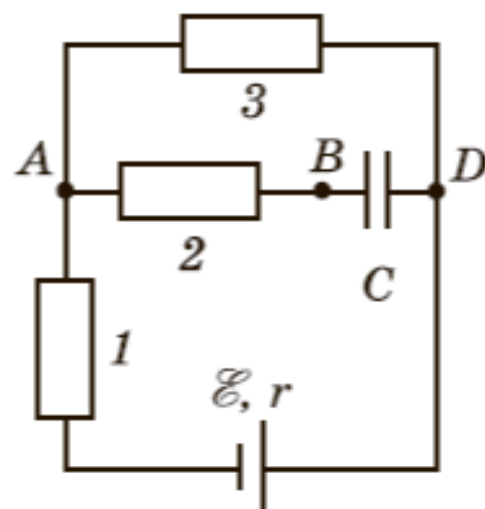


Рис. 43.8

21. Напряжение на концах участка цепи, изображённого на рисунке 43.14, равно 140 В. Известно, что  $C_1 = 2$  мкФ,  $C_2 = 5$  мкФ,  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 20$  Ом,  $R_3 = 40$  Ом. Заряд какого из двух конденсаторов больше? Во сколько раз?

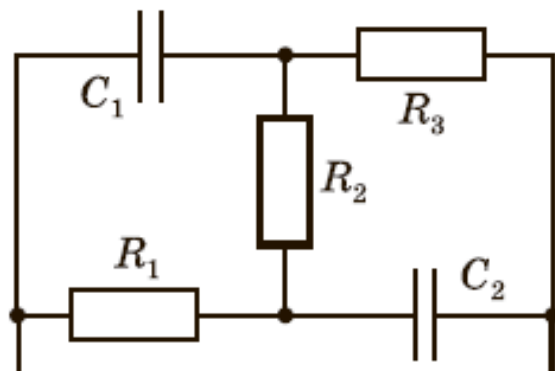


Рис. 43.14



24. На рисунке 43.17 изображена схема электрической цепи. Какой заряд пройдёт через ключ после его замыкания? Электроёмкости конденсаторов  $C_1 = 4 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 2 \text{ мкФ}$ , сопротивления резисторов  $R_1 = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ , напряжение на полюсах источника тока  $U = 10 \text{ В}$ . Внутренним сопротивлением источника можно пренебречь.

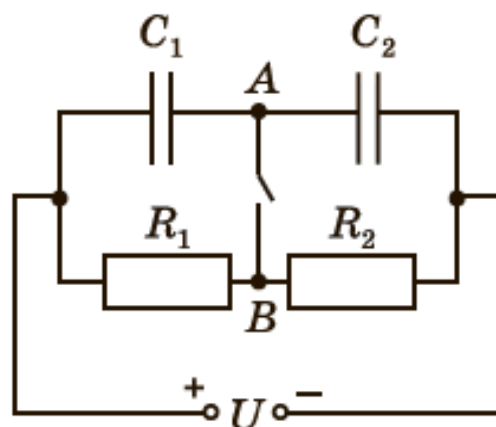


Рис. 43.17

## СХЕМА РАБОТЫ С КЛЮЧЕВОЙ СИТУАЦИЕЙ

1. «Что тут происходит?»: какие физические явления происходят в этой ситуации?
2. Какие могут быть варианты развития событий? Качественное рассмотрение.
3. Какие закономерности справедливы для этой ситуации?
4. Какие задачи можно поставить и решить, используя эти закономерности?
5. Как можно развить эту ситуацию?