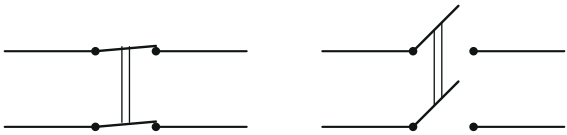
Две фотолампы: последовательно и параллельно

Задача 5. [ИОШ 2021/22, 9 класс, задача 5] При фотографировании в помещении с двумя фотолампами с ограниченным ресурсом работы используется следующая методика работы. При наводке на резкость, выборе экспозиции и т. д. лампы включают не на полную мощность (последовательно), а при фотографировании лампы включают параллельно, обеспечивая максимальную освещенность фотографируемого объекта. Предложите такую схему соединения двух ламп, чтобы лампы были подключены к источнику последовательно, но при включении одного выключателя их соединение с источником менялось на параллельное. Во сколько раз возрастает освещенность объекта при таком переключении? Считать, что вся энергия, выделяющаяся в лампочках, превращается в свет. В распоряжении имеются один идеальный источник электрического напряжения, две одинаковых электрических лампы, один двухполюсный выключатель и провода. Двухполюсный выключатель одновременно замыкает или размыкает два провода (см. рисунок).



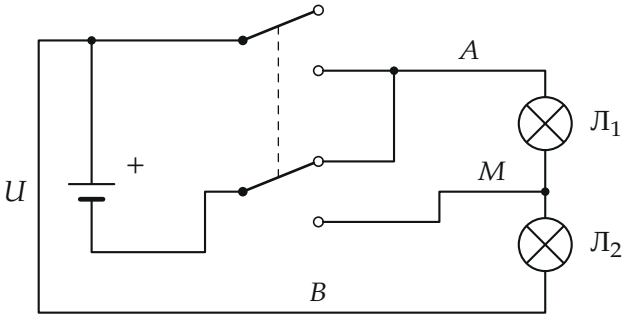
Двухполюсный выключатель

▲ **Решение.** **Что происходит.** Источник идеальный: напряжение U на нём одно и то же при любой нагрузке. При последовательном соединении на каждую лампу приходится половина напряжения, при параллельном — всё. Мощность лампы растёт как квадрат напряжения, поэтому параллельное включение даёт заметно больше света. Это задача на последовательное и параллельное соединение и закон Джоуля–Ленца; первая часть — построение схемы.

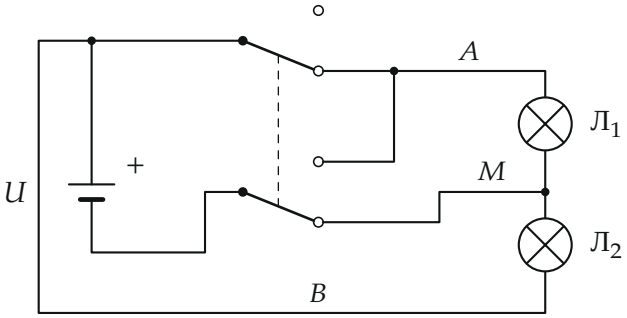
Обозначения. U — напряжение источника; R — сопротивление одной лампы (лампы одинаковы, сопротивление считаем неизменным); $Л_1$, $Л_2$ — лампы; A, M, B — узлы схемы (верх $Л_1$, точка между лампами, низ $Л_2$); $P_{посл}$, $P_{пар}$ — суммарные мощности ламп.

1. Чего требует параллельное соединение. Лампы соединены «цепочкой» A — $Л_1$ — M — $Л_2$ — B навсегда. Последовательно: A на одном полюсе источника, B на другом, M свободна. Параллельно: каждая лампа между полюсами, то есть A и B — на одном полюсе, M — на другом. Значит, при переключении узел A должен «перейти» с полюса «−» на полюс «+», а M — подключиться к «−». Удобно навсегда соединить B с «+», а выключателем менять подключение A и M.

2. Схема. Каждый нож выключателя поворачивается вокруг своего контакта (чёрная точка) и в двух положениях касается верхнего или нижнего контакта (кружки); ножи связаны (пунктир) и поворачиваются вместе. Нож 1 соединён с «+», нож 2 — с «−».



Положение «наводка»: нож 1 ни с чем не соединён, нож 2 подаёт «−» на узел A. Ток идёт $+ \to B \to Л_2 \to M \to Л_1 \to A \to -$: лампы последовательно.



Положение «съёмка»: нож 1 подаёт «+» на узел A, нож 2 — «−» на узел M. Лампа $Л_1$ включена между $A(+)$ и $M(-)$, лампа $Л_2$ — между $B(+)$ и $M(-)$: параллельно.

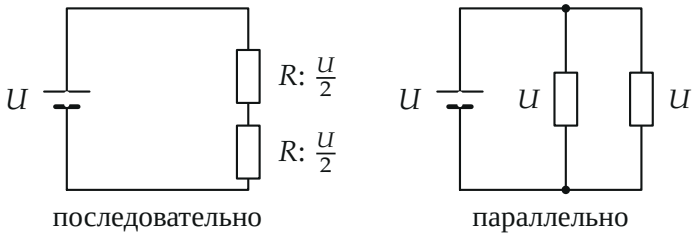
Короткого замыкания нет ни в одном положении: в положении «съёмка» узел A отсоединён от «−» (нож 2 ушёл на M), а «+» и «−» соединены только через лампы.

3. Мощность при последовательном соединении. Ток через обе лампы один, сопротивление цепи $2R$, на каждой лампе по закону Ома $U/2$. По закону Джоуля–Ленца $P = U_л^2/R$ для каждой лампы:

$$P_{\text{посл}} = 2 \cdot \frac{(U/2)^2}{R} = \frac{U^2}{2R}.$$

4. Мощность при параллельном соединении. На каждой лампе всё напряжение источника U:

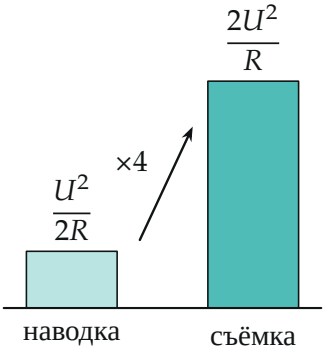
$$P_{\text{пар}} = 2 \cdot \frac{U^2}{R} = \frac{2U^2}{R}.$$



Эквивалентные схемы (лампы — резисторы R): последовательно на каждой лампе $U/2$, параллельно — U.

5. Отношение освещённостей. Вся энергия ламп переходит в свет, лампы и объект на месте, поэтому освещённость пропорциональна суммарной мощности ламп:

$$\frac{E_{\text{пар}}}{E_{\text{посл}}} = \frac{P_{\text{пар}}}{P_{\text{посл}}} = \frac{2U^2/R}{U^2/(2R)} = 4.$$



Суммарная мощность ламп (и освещённость) при переключении возрастает в 4 раза.

Обратите внимание. Выключатель, который только замыкает два провода (ничего не размыкая), задачу не решает: в последовательной схеме узел A соединён с «−», и если только добавлять провода, то в параллельной схеме A и B (а значит, «+» и «−») окажутся замкнуты накоротко. Поэтому нож 2 должен переходить с одного контакта на другой, как на схеме выше (так же устроена схема организаторов).

Ответ. Схема — на рисунках выше; освещённость возрастает в 4 раза.

Проверка. Размерность: U^2/R — ватты, отношение безразмерно. Второй способ — через ток: последовательно $I = U/(2R)$, $P_{\text{посл}} = I^2 \cdot 2R = U^2/(2R)$; параллельно ток источника $I = 2U/R$, $P_{\text{пар}} = UI = 2U^2/R$. Отношение то же. Каждая лампа при съёмке горит в $(U/(U/2))^2 = 4$ раза ярче, чем при наводке.

Физический смысл. При идеальном источнике мощность определяется напряжением на лампе, а она квадратична по напряжению: удвоили напряжение на каждой лампе — света в 4 раза больше.

Ответ. Схема: узел B (низ второй лампы) соединён с «+»; нож 1 выключателя от «+» подключается к верху первой лампы A, нож 2 от «−» переходит с A на точку M между лампами (рисунки в решении). Освещённость возрастает в 4 раза.