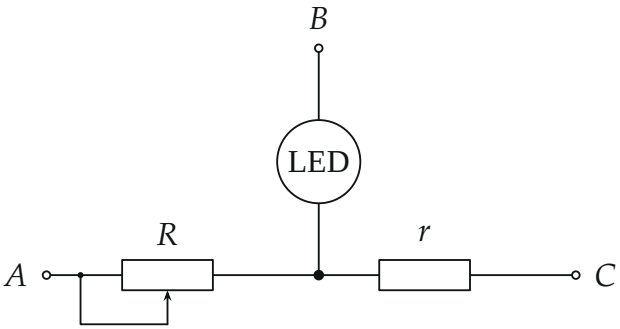
Три в одном

Задача 1. [ВсОШ 2025/26, 9 класс, практический тур, задача 2] **Три в одном.** Внутри серого ящика находятся три элемента: светодиод (LED), переменный резистор R и постоянный резистор r, соединённые по схеме, показанной на рисунке. Сопротивление переменного резистора может изменяться в пределах от $R_{\min}$ до $R_{\max}$. Ручка регулировки R и светодиод выведены наружу серого ящика.



1. Установите соответствие между выводами 1, 2, 3 на ящике и выводами A, B, C на схеме.
2. Определите полярность включения светодиода.
3. Найдите значения сопротивлений r, $R_{\min}$ и $R_{\max}$.
4. Измерьте вольт-амперную характеристику светодиода в прямом направлении.
5. Постройте график полученной вами вольт-амперной характеристики. Оценка погрешностей при выполнении этого пункта не требуется.

Оборудование: серый ящик; отвёртка для регулировки сопротивления переменного резистора; макетная плата; соединительные провода; мультиметр (в режиме вольтметра и омметра) с щупами; держатель для батареек; две батарейки типа AAA; масштабно-координатная бумага для построения графика. Комплект для измерений не разбирать! Во избежание разряда батарейки не держите цепь замкнутой, когда не производите измерений! Режимом амперметра

пользоваться запрещено! Для мультиметра примите погрешность прямого измерения равной 3 единицам последнего разряда, но не менее 1 процента от измеряемой величины.

▲ **Решение. Что происходит.** Три вывода ящика — это три конца «звезды» с общей точкой внутри: к ней подходят светодиод, R и r. Элементы различаются двумя признаками: светодиод проводит ток в одну сторону, а переменный резистор меняет сопротивление ручкой. По этим признакам находим выводы и полярность. Амперметра нет, поэтому ток измеряем косвенно: напряжение на резисторе, сопротивление которого известно, даёт ток по закону Ома. Именно так строим вольт-амперную характеристику (ВАХ) светодиода.

Обозначения. $\mathcal{E}$ — напряжение батареек (две AAA последовательно), U — напряжение на светодиоде, U_V — показание вольтметра между выводами 2 и 3, R_Ω — показание омметра между ними.

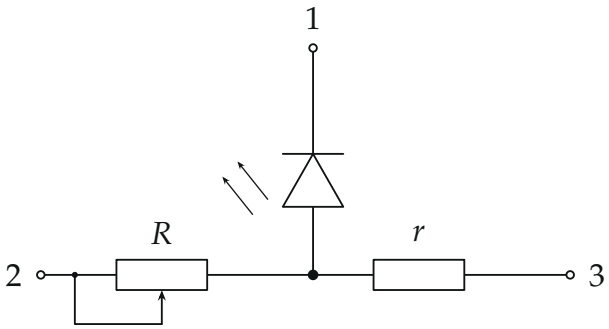
Пункт 1. Выводы. Для каждой пары выводов ожидаем:

пара	между выводами	зависит от ручки	зависит от полярности
A–C	$R + r$	да	нет
A–B	R + LED	да	да
B–C	r + LED	нет	да

Общий для двух «несимметричных» пар вывод — B, от которого идёт светодиод. Дальше проверяем батарейкой: её двух AAA (около 3 В) хватает, чтобы светодиод засветился. При «плюсе» батарейки на выводе 2 и «минусе» на выводе 1 светодиод горит, и его яркость меняется ручкой: на пути тока стоит R, значит пара $1, 2$ — это B, A. При «плюсе» на выводе 3 светодиод горит, а ручка яркость не меняет: на пути тока r, значит пара $1, 3$ — это B, C. Вывод 1 общий — это B; тогда $2 \leftrightarrow A$, $3 \leftrightarrow C$:

$$A\text{–}2, \qquad B\text{–}1, \qquad C\text{–}3.$$

Пункт 2. Полярность. Светодиод горит, когда ток идёт от выводов 2 и 3 к выводу 1 (при «плюсе» на выводе 1 он не горит). Значит, ток входит в светодиод со стороны общей точки и выходит к выводу 1: анод — у общей точки («снизу» на рисунке), катод — у вывода 1.



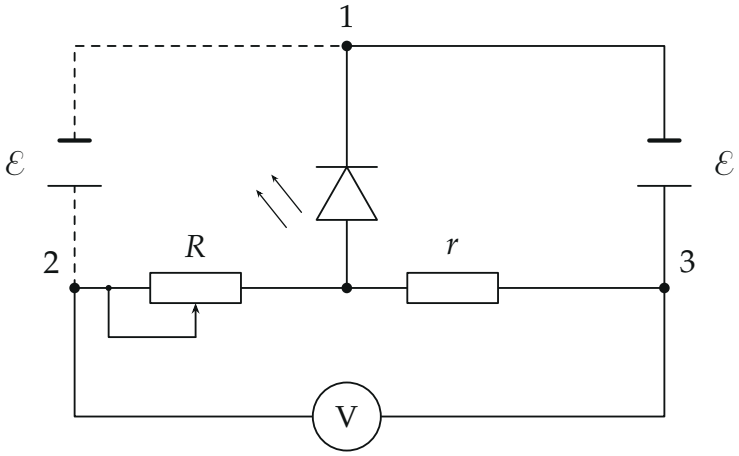
Обратите внимание: у некоторых мультиметров в режиме омметра напряжения не хватает, чтобы открыть светодиод, и прибор показывает «бесконечность» в обе стороны. Тогда полярность находим по свечению от батарейки, как выше.

Пункт 3. Сопротивления r, $R_{\min}$, $R_{\max}$. Чтобы найти r, сравним напряжения на r и на R при одном и том же токе светодиода: сопротивления относятся как напряжения. На паре выводов 2, 3 светодиод не мешает омметру: его вывод 1 никуда не подключён.

Подключим батарейку «плюсом» к выводу 3, «минусом» к выводу 1 и вольтметр к выводам 2, 3 (рисунок, сплошная батарейка). Ток идёт $3 \to r \to$ светодиод $\to 1$; через вольтметр и R ток не идёт (вольтметр считаем идеальным), поэтому вольтметр показывает напряжение на r:

$$U_V = Ir = (1137 \pm 11)\ \text{мВ}, \qquad \mathcal{E} = U(I) + U_V.$$

Теперь подключим «плюс» к выводу 2 (пунктирная батарейка). Ток идёт $2 \to R \to$ светодиод $\to 1$, вольтметр показывает напряжение на R: $U'_V = IR$. Вращая ручку, добьёмся $U'_V = U_V$ (получилось 1142 ± 11 мВ). Раз $U(I)$ на светодиоде при свечении строго растёт с током и $\mathcal{E}$ одна и та же, одинаковые U_V и U'_V означают одинаковый ток; тогда $Ir = IR'$, то есть $R' = r$.



Не меняя положения ручки, отключим батарейку и измерим омметром $R_\Omega = r + R' = 2r$: $R_\Omega = (400 \pm 4)$ Ом, откуда $r = (200 \pm 2)$ Ом. Поворачиваем ручку до упора вниз: $R_{\Omega 1} = (250 \pm 3)$ Ом $= r + R_{\min}$, $R_{\min} = (50 \pm 4)$ Ом. Поворачиваем до упора вверх (предел омметра 20 кОм): $R_{\Omega 2} = (10{,}45 \pm 0{,}11)$ кОм $= r + R_{\max}$, $R_{\max} = (10{,}25 \pm 0{,}11)$ кОм.

Пункт 4. ВАХ светодиода. Оставляем батарейку «плюсом» на выводе 2. Ток идёт $2 \to R \to$ светодиод $\to 1$. Через вывод 3 тока нет (вольтметр идеален), поэтому потенциал вывода 3 равен потенциалу общей точки: вольтметр между выводами $1, 3$ показывает напряжение U на светодиоде, а между $2, 3$ — напряжение на R, $U_V = IR$. Для каждого положения ручки: омметром (батарейка отключена) измеряем $R_\Omega = R + r$ на выводах $2, 3$, затем включаем батарейку, измеряем U и U_V, батарейку отключаем. Ток светодиода равен току через $R = R_\Omega - r$:

$$I = \frac{U_V}{R_\Omega - r}.$$

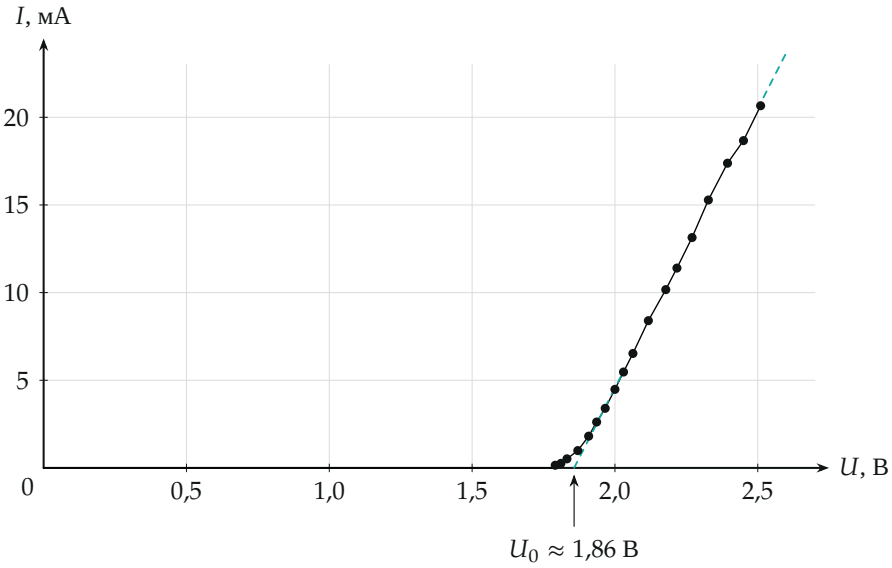
Результаты (строки по убыванию R_Ω, ток вычислен при $r = 198{,}5$ Ом

— в пределах погрешности $r = 200 \pm 2$ Ом):

R_Ω, кОм	U, В	U_V, мВ	I, мА
10,15	1,791	1449	0,15
5,76	1,811	1429	0,26
2,91	1,832	1398	0,52
1,577	1,870	1360	0,99
0,924	1,908	1312	1,81
0,684	1,936	1274	2,62
0,564	1,966	1244	3,40
0,467	2,000	1203	4,48
0,412	2,030	1167	5,47
0,371	2,063	1127	6,53
0,325	2,117	1063	8,40
0,297	2,178	1002	10,17
0,283	2,217	963	11,40
0,267	2,270	900	13,14
0,253	2,327	833	15,28
0,242	2,394	756	17,38
0,236	2,450	700	18,67
0,229	2,510	630	20,66

Обратите внимание: в трёх последних строках $R_\Omega < r + R_{\min} = 250$ Ом — ниже значения, измеренного в п. 3 (разность больше погрешности омметра). На форму ВАХ это почти не влияет: точки ложатся на общую плавную кривую, а ток вычисляется по самой разности $R_\Omega - r$, так что при малых R он чувствителен к погрешности r (до $\pm 15\,\%$).

Пункт 5. График. Ток через светодиод пренебрежимо мал до напряжения около 1,8 В, затем быстро растёт; выше 2 В кривая почти прямая. Продолжение прямого участка на ось U даёт напряжение «открывания» $U_0 \approx 1{,}86$ В, наклон прямого участка — ≈ 32 мА/В, то есть дифференциальное сопротивление около 31 Ом.



Проверка. Сумма $U + U_V$ должна равняться $\mathcal{E}$: в таблице она убывает с 3,24 В до 3,14 В по мере роста тока до 20 мА, то есть батарейки имеют внутреннее сопротивление порядка 5 Ом (0,1 В / 20 мА), и это нормально. Значение $R' = r$ согласуется с независимым измерением омметром ($2r = 400$ Ом). Смысл: светодиод — нелинейный элемент, и его ВАХ можно снять без амперметра, если последовательно с ним стоит резистор с известным сопротивлением.

Ответ. 1) A–2, B–1, C–3; 2) анод (плюс) светодиода у общей точки, катод — у вывода 1; 3) $r = (200 \pm 2)$ Ом, $R_{\min} = (50 \pm 4)$ Ом, $R_{\max} = (10{,}25 \pm 0{,}11)$ кОм; 4)–5) таблица и график в решении: ток практически нулевой до $\approx 1{,}8$ В, далее быстрый рост (≈ 20 мА при 2,5 В).