

1. Самостоятельный разряд

При какой напряженности поля начнется самостоятельный разряд в водороде, если энергия ионизации молекул равна $2,5 \cdot 10^{-18}$ Дж, а средняя длина свободного пробега 5 мкм? Какую скорость имеют электроны при ударе о молекулу?

Решение. Самостоятельный разряд в водороде начнется, если энергия E , приобретенная электроном в поле на длине свободного пробега L , равна энергии ионизации W :

$$eEL = W,$$

тогда

$$E = \frac{W}{eL}.$$

Скорость v электрона при ионизации атомов определяется из условия равенства W и кинетической энергии:

$$v = \sqrt{\frac{2W}{m}}.$$

Вычисления:

$$E = \frac{2,5 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 3,1 \text{ МВ/м};$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 2300 \text{ км/с}.$$

Ответ: $E = 3,1 \text{ МВ/м}$; $v = 2300 \text{ км/с}$.

2. Ток в газе

К электростатической машине подключены соединенные параллельно лейденская банка и разрядник. Сила тока электростатической машины $I = 10^{-5}$ А. Емкость лейденской банки $C = 10^{-8}$ Ф. Чтобы произошел искровой разряд, машина должна работать $t = 30$ с. Длительность разряда $\tau = 10^{-6}$ с. Определите среднюю силу разрядного тока I_p и напряжение зажигания искрового разряда U_z^1 .

Заряд, полученный конденсатором (лейденской банкой), от электростатической машины (генератора постоянного тока)

$$Q = I_z \cdot t_z$$

Напряжение на конденсаторе (оно же напряжение зажигания искрового разряда)

$$U = U_{\text{ис}} = Q/C = I \cdot t/C$$

Ток разряда:

$$I_p = Q/\tau$$

3. Кондесатор и электрон

Электрон влетает в плоский горизонтальный конденсатор параллельно его пластинам со скоростью $v_0 = 1,0 \cdot 10^7$ м/с. Напряженность поля в конденсаторе $E = 10$ кВ/см, длина конденсатора $\ell = 5,0$ см. Найти модуль и направление скорости электрона в момент вылета его из конденсатора. На сколько отклонится электрон от первоначального направления?

Сила F , действующая на электрон

$$F = eE.$$

Из второго закона Ньютона ускорение электрона

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}.$$

Электрон пройдет расстояние ℓ за время

$$t = \frac{\ell}{v_0}.$$

Вертикальная составляющая скорости электрона при вылете из конденсатора

$$v_y = at = \frac{eE}{m} \cdot \frac{\ell}{v_0}.$$

Скорость электрона при вылете из конденсатора

$$v = \sqrt{v_0^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + \left(\frac{eE}{m} \cdot \frac{\ell}{v_0}\right)^2} = \sqrt{10^7 + \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4}{9,1 \cdot 10^{-31}} \cdot \frac{0,05}{10^7}\right)^2} = 1,3 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

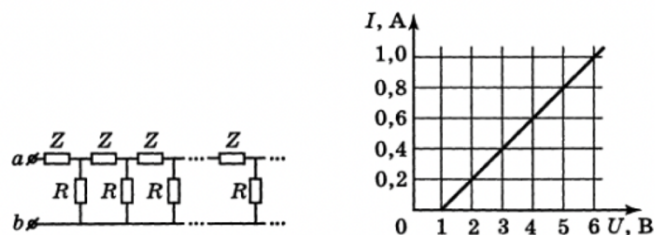
Отклонение электрона в вертикальном направлении

$$y = \frac{at^2}{2} = \frac{eE}{2m} \cdot \left(\frac{\ell}{v_0}\right)^2 = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} \cdot \left(\frac{0,05}{10^7}\right)^2 = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Ответ: $v = 1,3 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $y = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

4. Бесконечная ВАХ

ЗАДАЧА 10. (Всеросс., 1999, финал, 11) Бесконечная цепочка составлена из одинаковых нелинейных элементов Z и резисторов с сопротивлением $R = 4 \text{ Ом}$ (рис. слева). Вольт-амперная характеристика цепочки, измеренная между входными клеммами a и b , изображена на рис. справа. Определите графическим построением вольт-амперную характеристику нелинейного элемента Z .



Решение:

***11.73.** Заменяем бесконечную цепочку эквивалентной схемой, содержащей первое звено и нелинейный элемент X (см. рис. 178). Вольт-амперная характеристика (ВАХ) этого элемента совпадает с ВАХ бесконечной цепочки, заданной в условии. Построим на графике,

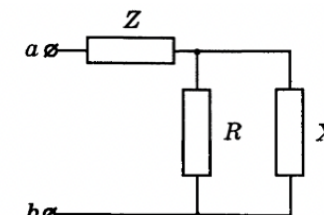


Рис. 178

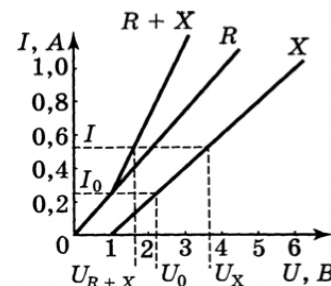


Рис. 179

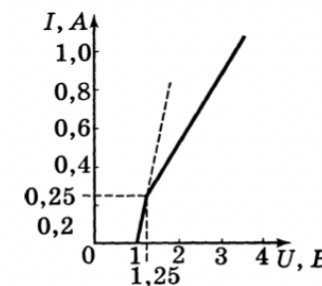


Рис. 180

заданном в условии задачи, вольт-амперную характеристику резистора R (прямая, проходящая через точку $U = 0, I = 0$) (см. рис. 179). На этом же графике построим сумму ВАХ резистора R и нелинейного элемента X . Обозначим эту характеристику через $R + X$.

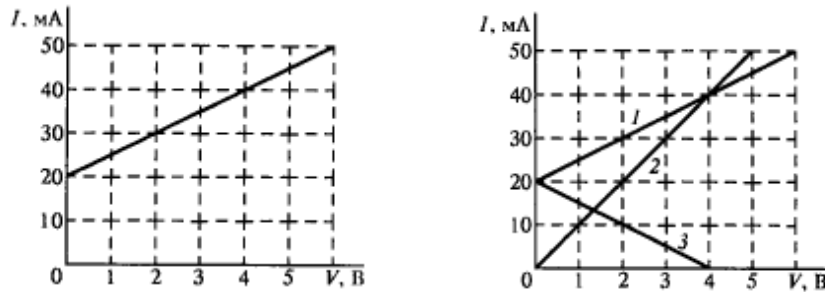
Выберем теперь некоторое напряжение U_X на входе цепочки. Определим по ВАХ элемента X силу тока I , соответствующую выбранному напряжению. Такая же сила тока будет протекать через элемент Z и через параллельно включенные R и X . Определим по графику напряжение U_{R+X} , а затем напряжение на элементе Z , равное $U_Z = U_X - U_{R+X}$.

Таким образом, задавая различные напряжения U_X , можно определить силу тока $I_Z = I$ и напряжение U_Z на нелинейном элементе Z . Это позволяет построить его вольт-амперную характеристику (рис. 180). Точка излома ВАХ есть

$$U = U_0 - 1 \text{ В} = 1,25 \text{ В}, I = I_0 = 0,25 \text{ А}.$$

5. Элемент Z

На рис. (слева) изображена вольтамперная характеристика двух соединенных параллельно элементов, одним из которых является резистор с сопротивлением $R = 100 \text{ Ом}$, а другим — неизвестный элемент Z. Используя заданную вольтамперную характеристику, постройте вольтамперную характеристику Элемента Z.

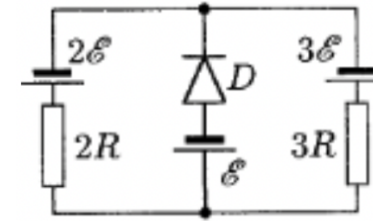


Решение:

На рисунке (справа) проведем вольтамперную характеристику резистора с сопротивлением R (прямая 2). Поскольку неизвестный элемент Z и резистор соединены параллельно, то падения напряжения на них всегда равны, а их общий ток равен алгебраической сумме токов через каждый элемент. Поэтому для построения вольтамперной характеристики неизвестного элемента Z. нужно при фиксированных значениях напряжения V из заданной вольтамперной характеристики (прямая 1) вычесть вольтамперную характеристику резистора R (прямая 2). Полученная таким способом прямая 3 является вольтамперной характеристикой неизвестного элемента.

6. Схема

В схеме, изображенной на рисунке, определите ток через идеальный диод D и напряжение на диоде. Параметры схемы указаны на рисунке, внутренними сопротивлениями батарей пренебречь.



Предположим, что диод открыт и через него течет некоторый ток I . Напряжение на диоде в этом случае равно нулю. Соответствующая схема будет иметь вид, изображенный на рисунке. Из закона сохранения заряда следует

$$I = I_1 + I_2$$

Запишем закон Ома для левого контура:

$$2\mathcal{E} - \mathcal{E} = I_1 2R$$

и для правого контура:

$$3\mathcal{E} - \mathcal{E} = I_2 3R$$

Выразим отсюда токи I_1 и I_2 :

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{2R}, I_2 = \frac{2\mathcal{E}}{3R}$$

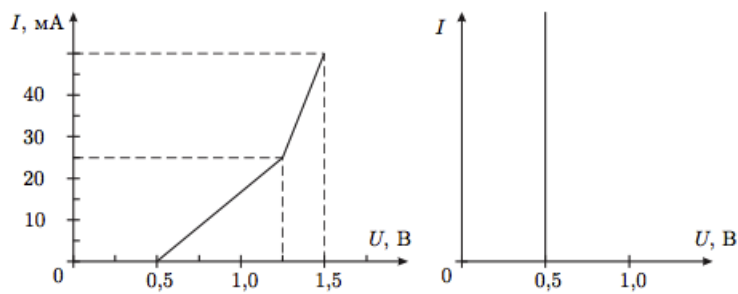
и найдем ток через диод:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{7}{6} \frac{\mathcal{E}}{R}$$

Поскольку мы получили, что $I > 0$, наше предположение верно - через диод течет ток $I = \frac{7}{6} \frac{\mathcal{E}}{R}$, а напряжение на диоде равно нулю.

7. Блок и Гак

Теоретик Баг предложил экспериментатору Глюку определить схему электрического «чёрного ящика» (ЧЯ) с двумя выводами. В ящике находятся два одинаковых диода и два разных резистора. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) «чёрного ящика» приведена на левом рисунке, а ВАХ диода — на правом рисунке. Восстановите схему ЧЯ и определите сопротивление каждого из резисторов.



Возможное решение

Поскольку на ВАХ присутствуют два излома, то в цепи два диода включены последовательно. Так как ток через ЧЯ начинает течь при достижении напряжения 0,5 В, следует считать, что к одному из диодов параллельно не подключены резисторы. Для удобства дальнейшего анализа, перерисуем ВАХ чёрного ящика, исключив из неё участок с одиночным диодом. Получим характеристику, изображённую на рис. 22. Так как теперь ВАХ содержит излом, а сила тока линейно зависит от напряжения, мы можем сделать вывод, что в цепи есть резистор, включенный параллельно диоду (схема на рис. 23) или диоду с последовательно соединённым с ним резистором (схема на рис. 24).

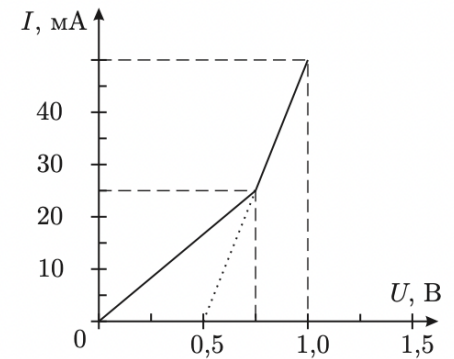


Рис. 22

Вторая схема не соответствует фрагменту цепи ЧЯ, так излом ВАХ происходит при напряжении большем, чем напряжение открытия $U_0 = 0,5$ В. Таким образом остается проанализировать первую схему.

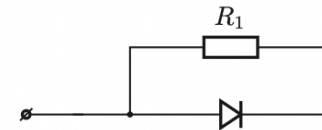


Рис. 23

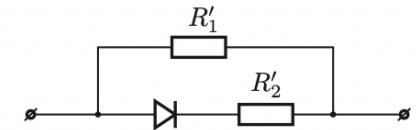


Рис. 24

Пока диод закрыт, сила тока в цепи пропорциональна напряжению, а коэффициент пропорциональности найдем, взяв напряжение и силу тока для точки излома ВАХ:

$$R_{1,2} = R_1 + R_2 = (750 \text{ мВ} / 25 \text{ мА}) = 30 \text{ Ом}.$$

В момент открытия диода, напряжение на нём, а значит и на резисторе R_1 , будет равно $U_0 = 0,5$ В. Значит:

$$R_1 = (500 \text{ мВ} / 25 \text{ мА}) = 20 \text{ Ом}.$$

Сопротивление резистора $R_2 = R_{1,2} - R_1 = 10 \text{ Ом}$. Изобразим цепь ЧЯ и укажем на ней значения сопротивлений резисторов (рис. 25).

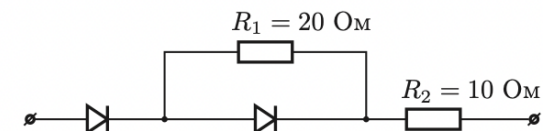
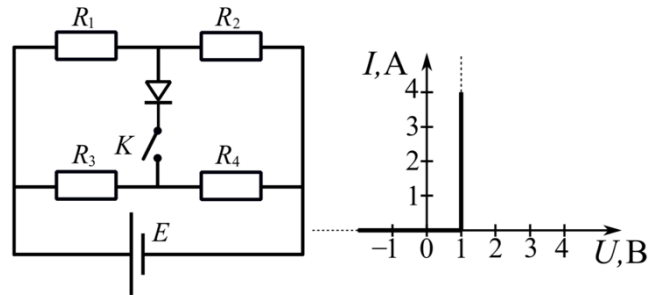


Рис. 25

8. Ух... Физтех... Еле найдешь

В цепи используется мостовая схема (см. рис.). ЭДС идеального источника $E = 10 \text{ В}$, $R_2 = 12 \text{ Ом}$, $R_3 = 8 \text{ Ом}$, $R_4 = 2 \text{ Ом}$. Вольт-амперная характеристика диода показана на рисунке, пороговое напряжение диода $U_0 = 1 \text{ В}$.

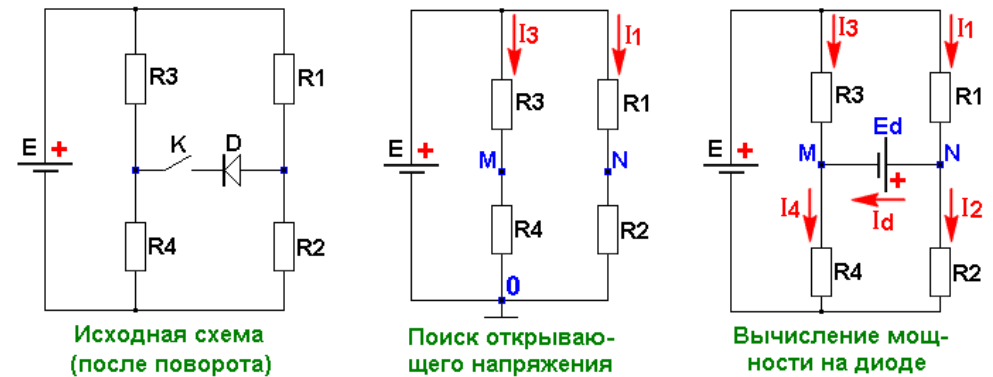


1. Найти ток через резистор R_3 при разомкнутом ключе К.
2. При каких значениях R_1 ток потечет через диод при замкнутом ключе К?
3. При каком значении R_1 мощность тепловых потерь на диоде будет равна $P_D = 1,25 \text{ Вт}$?

Решение:

Ваша задача становится лёгкой, если не полениться пере-чертить электро-схему для её удобо-читаемости. Многие недо-оценивают эту казалось бы "дурную работу". Однако в моей практике было много случаев, когда мои сотрудники не могли решить техническую проблему. Шеф поручал "труд-няшку" мне, освобождал меня от прочей рутины, и я выручал наше подраз-деление. Коллеги удивлялись, "Как тебе это удалось?!". Я честно призна-вался, что я всего лишь победил свою лень и перечертил "закрученную" схему в ясно понятный вид.

“Поворот схемы”, после которого всё легко читается и осмысливается: Те-перь сигнал распространяется слева-направо, а потенциал спадает сверху-вниз (=популярный приём у электронщиков). Продолжаем оптимизацию схемы...



Дано : $E := 10 \text{ В}$ $R_2 := 12$ $R_3 := 8$ $R_4 := 2 \text{ Ом}$ $E_d := 1 \text{ В}$ $P_D := 1.25 \text{ Вт}$

Ток диода мощностью P_D : $I_d := \frac{P_D}{E_d} = 1.25 \text{ А}$

Ключевое слово Маткада, предшес-
твующее вводу системы уравнений: Given

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 \quad I_1 = I_d + I_2 \quad U_m = I_4 \cdot R_4 \quad U_n = I_2 \cdot R_2$$

$$U_n = U_m + E_d \quad E - U_m = I_3 \cdot R_3 \quad E - U_n = I_1 \cdot R_1$$

Решение системы в виде
числового вектора-столбца:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ U_m \\ U_n \\ R_1 \end{pmatrix} := \text{Find}(I_1, I_2, I_3, I_4, U_m, U_n, R_1) = \begin{pmatrix} 1.667 \\ 0.417 \\ 0.75 \\ 2 \\ 4 \\ 5 \\ 3 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{А} \\ \text{А} \\ \text{А} \\ \text{А} \\ \text{В} \\ \text{В} \\ \text{Ом} \end{matrix}$$

Проверка решения методом Баланса
мощностей : Мощность Источника : $P_i := E \cdot (I_1 + I_3) = 24.167 \text{ Вт}$

Мощность всех
потребителей : $P_{\text{пот}} := I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 + P_D = 24.167 \text{ Вт}$

Мощности совпали ==> Проверка успешна!

Для случая (а) "Ключ К замыкают" удаляем ключ и диод из схемы, по-тому что вопрос хоть и сформулирован "При каком максимальном значе-нии R_1 ток потечет через диод?", мы понимаем, что на самом деле ника-кого тока ч-з диод нету. В процессе поиска зависимости напряжения отпи-рания диода от значения сопротивления R_1 нам надо всего лишь подобрать такое максимальное значение R_1 , при котором диод откроется (начнёт пропускать ток).

На оптимизированной схеме сразу видны 2 независимых и простых Делителя напряжения. Почитайте статью "Делитель напряжения" [Ссылка1](#), и Вы мигом сообразите, что напряжение на резисторе R_4 легко вычисляется как

$$U_m = E \cdot R_4 / (R_3 + R_4) = 2 \text{ В.}$$

При бесконечно-большом сопротивлении R_1 (при "обрыве" его) диод заперт обратным напряжением. Уменьшая сопротивление R_1 , мы увеличиваем ток I_1 , который повышает напряжение на R_2 . И когда потенциал в точке N (относительно нуль-точки "0") станет "плюсовее" потенциала в точке M на величину E_d , то начнётся ток ч-з диод (диод "откроется").

Вычисляем:

$$U_n = U_m + E_d = 3 \text{ В.}$$

Поскольку

$$U_n = E \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

то

$$R_1 = E \cdot R_2 / U_n - R_2 = 28 \text{ Ом.}$$

Ответ 1: пороговое (максимальное) значения $R_1 = 28 \text{ Ом}$.

Проверим, действительно ли делитель напряжения $R_1 R_2$ обеспечивает потенциал отпираания $U_n = 3 \text{ В}$?

$U_n = E \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 3 \text{ В}$ - всё верно!

Для вычисления R_1 , задающего мощность тепловых потерь на диоде, вычислим ток диода, соответствующий заданной мощности $P_n = 1,25 \text{ Вт}$:

$$I_d = P_n / E_d = 1,25 \text{ А} .$$

У этого идеально-вычурного диода напряжение отпираания $E_d = 1 \text{ В}$ равно рабочему прямому напряжению при любом токе (В реальности такого не бывает, в практических расчётах лучше применять экспоненциальную зависимость вольт-амперной характеристики диода). Для расчёта такого странного диода лучше заменить ключ на переключку, а диод на источник ЭДС с напряжением E_d и током I_d . Причём, направление тока I_d у нас вопреки полярности E_d ! Поэтому диод-псевдо-источник поглощает мощность (сопротивляется и греется) а не отдаёт её.

В схеме 3 узла и 7 неизвестных. По первому закону Кирхгофа составляем 2 уравнения, остальные $7-2 = 5$ - по 2му закону.

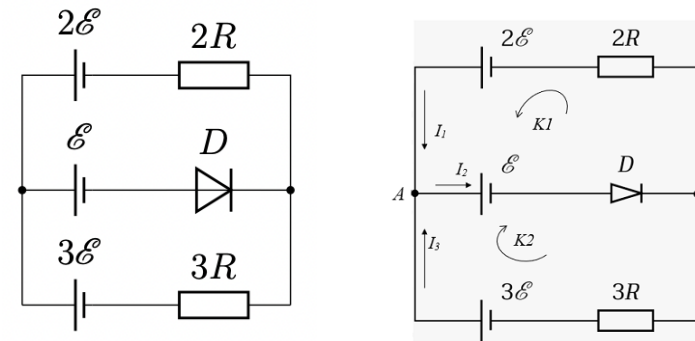
Систему и её решение я показал на скриншоте приложения [Маткад](#)

[\(ссылка\)](#) . Маткад-скриншот прилагаю. Я добавил в него подробные комментарии зелёным цветом.

Ответ 2: мощность заданных тепловых потерь на диоде обеспечивается при сопротивлении $R_1 = 3 \text{ Ома}$.

9. Идеальный D

Определите силу тока I , текущего через идеальный диод D в цепи, схема которой изображена на рисунке. Сопротивление $R = 1,0 \text{ кОм}$, а ЭДС $E = 100 \text{ В}$.



Решать будем по законам Кирхгофа.

Добавил к вашей схеме направления токов в ветвях и направления обхода контуров. Интуитивно предполагаем следующие направления токов (см.рис. справа).

Составим уравнение:

- по I закону Кирхгофа (для узла A)

$$I_2 = I_1 + I_3 \quad (1)$$

- по II закону Кирхгофа для контура K1 (с учетом выбранного направления обхода (против часовой стрелки))

$$2E - E = I_1 * 2R \quad (2)$$

- для контура K2 (направление обхода по часовой стрелке)

$$3E - E = I_3 * 3R \quad (3)$$

Из уравнения (2) имеем

$$I_1 = \mathcal{E} / 2R = 0,05 \text{ A}$$

Из уравнения (3) имеем

$$I_2 = 2\mathcal{E} / 3R = 0,07 \text{ A}$$

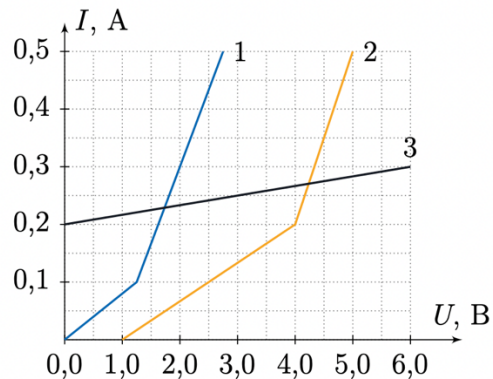
Тогда, из уравнения (1)

$$I_2 = 0,05 + 0,07 = 0,12 \text{ A}$$

В процессе решения мы выбрали направления тока I_2 совпадающим с направлением пропускания тока диодом. Знак перед значением тока I_2 положительный, следовательно изначально (интуитивно) направление тока было выбрано правильно. При этом мы решали задачу вообще не глядя на диод, поскольку сопротивлением он не обладает, значит падения напряжения на нем не будет, значит и тепловой мощности на нем выделяться тоже не будет. Поэтому, можно сделать вывод, что получившийся небольшой ток (0,12 A) не повредит диод.

10. Нелинейный элемент

Определите, используя рисунок, через какой нелинейный элемент идет больший ток, если его подключить к источнику с $U = 0,5 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 1 \text{ Ом}$.



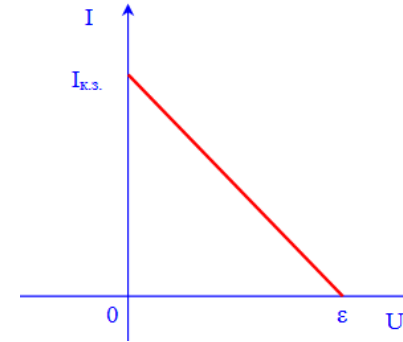
Решение. Если рассмотреть реальный источник как последовательно соединенный идеальный источник E и резистор R с сопротивлением, равным внутреннему, то напряжение на клеммах будет равно

$$U = E - IR,$$

откуда зависимость тока от напряжения:

$$I = (E - U) / R = E / R - U / R = I_{кз} - U / R,$$

где $I_{кз}$ – ток короткого замыкания.



Такая вольтамперная характеристика -нагрузочная прямая. Построим нагрузочную прямую источника в нашем случае. Она пройдет через две точки (0,5;0) и (0;0,5), которые соответствуют напряжению холостого хода и току короткого замыкания. По построению заметим, что нагрузочная прямая пересекает ВАХ красного нелинейного элемента в точке с наибольшим током 0,3 A.

