

Проскурин Михаил Борисович
Студент Московского физико-технического института (МФТИ), II курс, факультет общей и прикладной физики, призёр Всероссийских олимпиад школьников по физике и Международной юниорской естественно-научной олимпиады (IJSO).

Исследование электрических чёрных ящиков на постоянном токе

Электрический чёрный ящик – это электрическая цепь, которая спрятана в непрозрачном корпусе, внутрь которого нет непосредственного доступа. Из корпуса выходят несколько выводов, подключая к которым различные электроизмерительные приборы и снимая их показания, можно определить схему цепи чёрного ящика и найти параметры элементов, входящих в цепь. В статье обсуждаются вольтамперные характеристики (ВАХ) базовых элементов чёрных ящиков, работающих на постоянном токе: резистора, лампочки, диода, стабилитрона. Показаны способы нахождения ВАХ последовательно и параллельно соединённых базовых элементов. Даётся методика исследования (разгадывания) чёрных ящиков и приведён пример такого разгадывания.

1. Введение

В современном мире очень широко распространены различные электрические приборы. Для успешного ремонта этих приборов требуется знать их устройство и приёмы работы с ними. Но не всегда есть возможность увидеть, как именно устроен прибор. Однако это можно выяснить, используя знания о компонентах, из которых состоят сложные устройства. К сожалению, школьная программа почти не предусматривает формирование навыков работы с различными компонентами электрических цепей, хотя они и очень важны. Поэтому задания с чёрными ящиками (ЧЯ) получили широкое распространение на экспериментальных турах физических олимпиад школьников. В этой статье на конкретных примерах показаны приёмы работы с чёрными ящиками в процессе исследования их свойств и характеристик.

2. Вольтамперная характеристика

Рассмотрим чёрные ящики, для изучения, которых используется постоянный электрический ток. Базовыми элементами их схем часто служат: резисторы, лампочки, диоды, стабилитроны, источники постоянно-

го тока (батарейки). Для исследования участков цепи, состоящих из базовых элементов, можно использовать построение ВАХ – вольтамперных характеристик, представляющих собой графики зависимости силы тока, протекающего через исследуемый элемент или участок цепи, от приложенного к нему напряжения. Заметим, что можно также строить график зависимости напряжения от силы тока, но силу тока порой сложно регулировать; кроме того, одному и тому же значению силы тока могут соответствовать различные значения напряжения. Поэтому для удобства под вольтамперной характеристикой будет в дальнейшем пониматься зависимость именно силы тока от напряжения.

Для построения ВАХ некоторого участка AB с ЧЯ можно использовать цепь, схема которой дана на рис. 1. В неё включаются источник постоянного тока, ключ, резистор $R_{огр}$ (служащий для ограничения предельной силы тока в цепи), а также измерительные приборы: вольтметр и амперметр. Следует сказать, что все описанные ниже эксперименты и

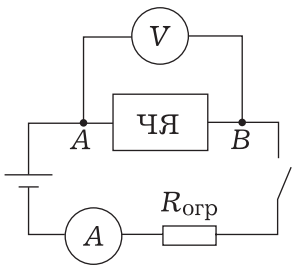


Рис. 1

расчёты сделаны в предположении использования идеальных измерительных приборов, т.е. таких, подключение которых никак не влияет на процессы, происходящие в цепи, что, естественно, не соответствует действительности. Так, амперметр имеет ненулевое сопротивление, а потому его подключение уменьшает силу тока в цепи. Но мы будем считать, что в рамках наших задач приборы идеальны и погрешности, которые они вносят, незначительны.

Прежде чем приступить к описанию методики разгадывания чёрных ящиков, рассмотрим вольтамперные характеристики каждого из базовых элементов. (Для упрощения в экспериментах использован источник тока с регулируемым выходным напряжением.)

3. ВАХ базовых элементов

Резистор. Для снятия ВАХ резистора собираем цепь по схеме, показанной на рис. 2. Вольтамперная характеристика данного элемента показана на рис. 3: резистор имеет линейную зависимость силы тока от напряжения.

В самом деле, из закона Ома для резистора с постоянным сопротивлением R на участке цепи следует, что $I = U/R$, т.е. прямая пропорциональная зависимость силы тока от напряжения. Причём ВАХ будет одной и той же при любой полярности источника тока, т.е. при смене знака («полярности») подаваемого на резистор напряжения. По

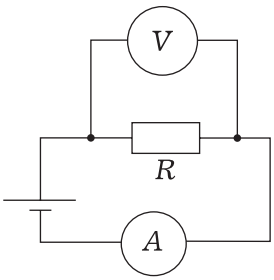


Рис. 2

вольтамперной характеристике резистора можно легко определить его сопротивление: $R = 1/k$, где k – угловой коэффициент ВАХ.

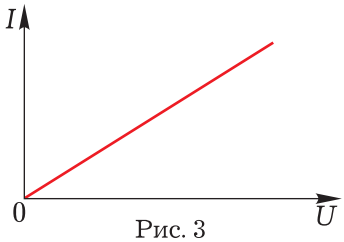


Рис. 3

Лампочка. Соберём цепь, схема которой представлена на рис. 4. Вольтамперная характеристика лампочки приведена на рис. 5.

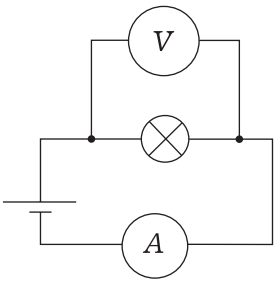


Рис. 4

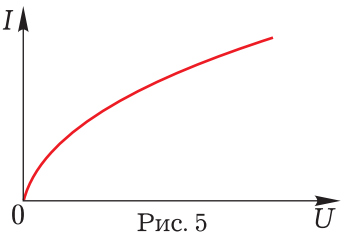


Рис. 5

Из рисунка видно, что при малом напряжении она подобна ВАХ резистора, т.е. имеет линейную зависимость. При увеличении напряжения график изгибается вследствие нагревания лампочки и соответственно роста её сопротивления. Причём ВАХ будет одной и той же при любой полярности подаваемого на лампочку напряжения.

По ВАХ лампочки можно легко определить её сопротивление при заданном напряжении или силе тока: $R_x = 1/k_x$, где k_x – угловой коэффициент прямой, проходящей через заданную точку и точку (0, 0). В частности, сопротивление лампочки в «холодном» состоянии (когда напряжение на ней приблизительно равно нулю) можно найти по угловому коэффициенту касательной, проведённой в точке (0, 0).

Полупроводниковый диод. Не все знают, что такое диод. Поэтому рассмотрим этот элемент подробнее. Диод – это полупроводниковый (реже ламповый) элемент, обладающий свойством пропускать ток только в одном направлении. У идеального диода в прямом направлении (т.е. при «правильной» полярности подключения) сопротивление равно нулю, а в обратном направлении равно бесконечности (т.е. ток равен нулю). На практике идеальных диодов не существует, поэтому рассматривается элемент с похожими свойствами, но в то же время имеющий некоторые особенности. Для начала снимем ВАХ диода, собрав цепь по схеме, изображённой на рис. 6. Диод – нелинейный элемент и его ВАХ нелинейна и выглядит, как на рис. 7. Рассмотрим характерные отличия реального диода от идеального. Во-первых, в прямом направлении он открывается не сразу, а начиная с некоторого напряжения (его называют напряжением открывания $U_{\text{откр}}$).

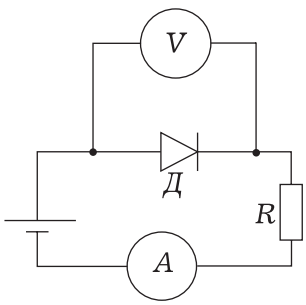


Рис. 6

При дальнейшем увеличении напряжения диод начинает пропускать ток и сила тока возрастает очень резко. Во-вторых, при обратной полярности подаваемого на диод напряжения через него идёт небольшой ток

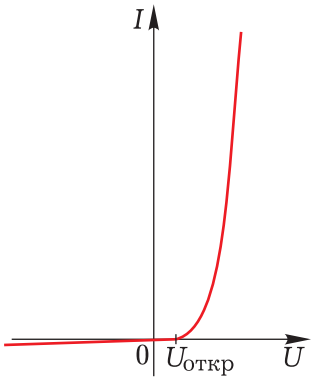


Рис. 7

(обычно несколько микроампер), который называется «обратным током». При слишком большом напряжении обратной полярности диод «пробивается» и выходит из строя. Заметим: поскольку у диода в случае тока прямого направления с ростом напряжения сопротивление очень быстро падает, его следует подключать через ограничительный резистор порядка 100 Ом, иначе он просто сгорит. И ещё: понятие «сопротивление диода», очень сильно зависящее от напряжения и силы тока, вообще обычно не вводится. Тем не менее, существуют такие параметры, которые характеризуют конкретный диод, и их можно измерить. Это открывающее напряжение $U_{откр}$, которое можно определить по излому графика вблизи точки (0, 0), а также сила обратного тока, которая находится по ВАХ непосредственно.

Стабилитрон. Для снятия ВАХ соберём цепь по схеме, показанной на рис. 8.

Стабилитрон имеет устройство, похожее на устройство полупроводникового диода. Поэтому у них схожие свойства

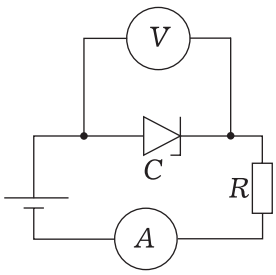


Рис. 8

при «прямом» включении, но в отличие от диода при определённом напряжении обратной полярности стабилитрон пропускает ток в обратном направлении. ВАХ этого элемента представлена на рис. 9. Интересно то, что при изменении силы обратного тока в довольно

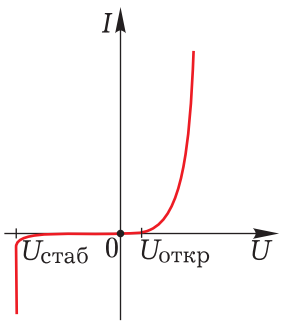


Рис. 9

широких пределах напряжение на стабилитроне почти не изменяется. Так как это свойство проявляется на «обратной» ветви ВАХ, стабилитрон обычно включают в цепь «наоборот». Таким образом, он поддерживает определённое напряжение (называемое напряжением стабилизации $U_{стаб}$) на участке цепи вне зависимости от силы тока, т.е. стабилизирует его, что собственно и дало такое название – стабилитрон. Так же, как и диод, это – нелинейный элемент.

4. Вольтамперные характеристики при параллельном и последовательном соединениях элементов

Итак, мы рассмотрели вольтамперные характеристики элементов по отдельности, но ведь возможны их различные соединения.

При параллельном соединении элементов «складываются» силы токов, а напряжения на них одинаковы. Например, если параллельно соединены резистор (прямая 1 на рис. 10) и диод (кривая 2), то их вольтамперные характеристики для любого напряжения U_x складываются по току $(I_3 = I_1 + I_2)$ – получается кривая 3, представляющая ВАХ параллельно соединённых резистора и диода.

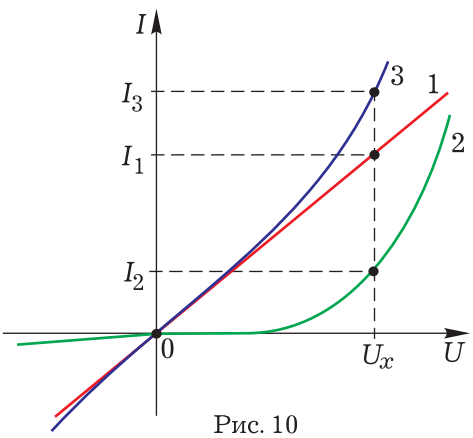


Рис. 10

В случае последовательного соединения элементов складываются напряжения при одинаковой силе тока. Например, пусть последовательно соединены резистор (прямая 1 на рис. 11) и диод (кривая 2), их вольтамперные характеристики для каждой силы тока I_x складываются по напряжению $(U_3 = U_1 + U_2)$, и получается кривая *3* – ВАХ последовательно соединённых резистора и диода.

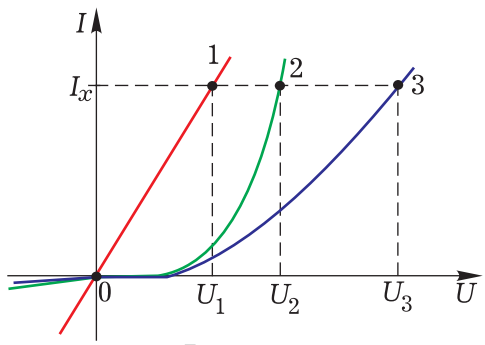


Рис. 11

5. Методика исследования чёрных ящиков

Исследуя чёрный ящик в цепи постоянного тока, следует придерживаться некоего алгоритма, чтобы разгадать его схему и узнать параметры элементов. Не все приведённые ниже советы могут оказаться полезными (всё зависит от конкретной схемы), но некоторые могут облегчить этот процесс. Этапы исследования можно, вероятно, провести в другом порядке, но приведённая последовательность кажется автору наиболее логически правильной. Итак, что же следует делать?

1. Надо подключать ко всем возможным парам клемм ЧЯ вольтметр (причём при разных полярностях его подключения). Если во всех случаях показания равны нулю, то ЧЯ не содержит источников тока (источник может быть внутри, но он, значит, никак не соединён с выводами или соединён через обратно включённый диод). Если же в каком-либо случае вольтметр покажет наличие напряжения, то с уверенностью можно сказать, что в ЧЯ есть источник тока (батарейка).

2. Далее ко всем парам клемм ЧЯ следует подключать омметр (тоже при разной полярности). Измеряя сопротивление с помощью омметра (мультиметра), на исследуемый элемент подают небольшое напряжение ($\approx$ 0,1-0,5 В) и измеряют силу тока, проходящего через него. Показание омметра соответствует делению поданного напряжения на силу тока. Естественно, что при подаче на элемент напряжения (даже очень мало-

го) разного знака он может вести себя по-разному. В связи с этим вводится понятие «полярности» подключения омметра. (Не стоит удивляться его «отрицательным» показаниям – они означают, что «полярности» напряжения и силы тока противоположны; это возможно, например, когда в исследуемом ЧЯ есть источник тока.)

Итак, если в каком-либо случае омметр покажет нулевое сопротивление, то, следовательно, эти клеммы накоротко замкнуты и их можно заменить одной клеммой. Во всех случаях надо делать проверку при разных полярностях, поскольку в цепях с диодами сопротивление между двумя точками зависит от направления тока.

3. На данном этапе понадобится стрелочный амперметр (или гальванометр с небольшим сопротивлением). Поочерёдно подключая ЧЯ через разные пары клемм к источнику тока согласно схеме на рис. 12 и замыкая ключ, нужно следить за его показаниями. Если при замыкании ключа

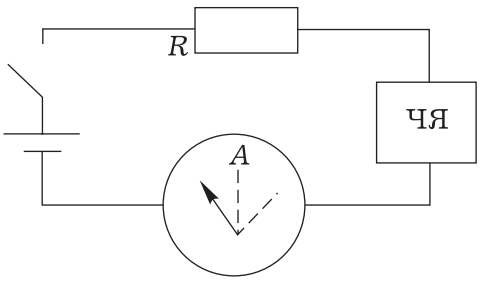


Рис. 12

стрелка амперметра скачком отклоняется от нулевого деления, а затем возвращается обратно, то в ЧЯ присутствует конденсатор – вероятно, он включён между данными клеммами. Отметим, что конденсатор не рассматривался выше, так как он не относится к типичным элементом ЧЯ, работающих на постоянном токе (зато часто используется в ЧЯ для переменного тока).

4. После этого следует получить ВАХ для всех пар выводов ЧЯ, к которым не подключён конденсатор и которые не замкнуты накоротко. Сделать это можно, например, с помощью схемы, приведённой на рис. 13, занося показания амперметра и вольтметра, снятые при двух полярностях на-

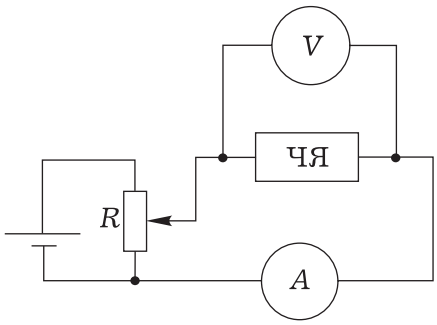


Рис. 13

пряжения на каждой паре клемм, в таблицу. По её данным строятся графики $I = f(U)$ для выбранных пар клемм. (Заметим, что напряжение между клеммами можно изменять с помощью переменного резистора.)

Анализируя все вольтамперные характеристики, делают выводы о схеме цепи в ЧЯ. Следует отметить, что результат разгадки ЧЯ не всегда однозначен. Обычно ищут самую простую из возможных схем.

6. Пример поиска схемы чёрного ящика на постоянном токе

Оборудование. Чёрный ящик с 4 выводами (рис. 14), источник постоянного тока с регулируемым напряжением (0 – 12 В), 2 мультиметра, соединительные провода.

Задание. Определить схему чёрного ящика и параметры её элементов.

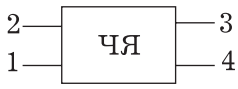


Рис. 14

Исследование

Действие 1. Поставив мультиметр в режим омметра, измеряем сопротивления между всеми парами выводов при различной полярности омметра. Полученные данные заносим в таблицу 1. (Поясним, что пересечение, например, столбца «+ –» и строки«R(2-3)» означает подключение к выводу 2 ЧЯ «+» омметра, а к выводу 3 его «–».)

Таблица 1

Сопротивление, Ом	Полярность	
	+ –	– +
R(1-2)	235	235
R(1-3)	190	190
R(1-4)	0	0
R(2-3)	61	61
R(2-4)	235	235
R(3-4)	190	190

Из таблицы видно, что выводы 1 и 4 накоротко замкнуты. Поэтому можно считать, что у ЧЯ только 3 вывода.

Действие 2. Строим вольтамперные характеристики для всех пар выводов при различных полярностях напряжения. Полученные данные приведены в таблицах 2–4 и отражены на рис. 15, 18, 21. (Отрицательные значения напряжения и силы тока соответствуют противоположной полярности подключения приборов и источника.)

Таблица 2

U, В	*I*, мА	*U*, В	*I*, мА
-10,0	-42	0,0	0
-9,5	-39,9	0,5	2,1
-9,0	-37,8	1,0	6,8
-8,5	-35,7	1,5	14,8
-8,0	-33,6	2,0	23,4
-7,5	-31,5	2,5	31,9
-7,0	-29,4	3,0	41,1
-6,5	-27,3	3,5	49,7
-6,0	-25,2	4,0	58,7
-5,5	-23,1	4,5	67,6
-5,0	-21	5,0	76,7
-4,5	-18,9	5,5	85,6
-4,0	-16,8	6,0	94,6
-3,5	-14,7	6,5	103,8
-3,0	-12,6	7,0	112,7
-2,5	-10,5	7,5	121,6
-2,0	-8,4	8,0	130,7
-1,5	-6,3	8,5	139,9
-1,0	-4,2	9,0	149,2
-0,5	-2,1	9,5	158,5
0,0	0,0	10,0	167,2

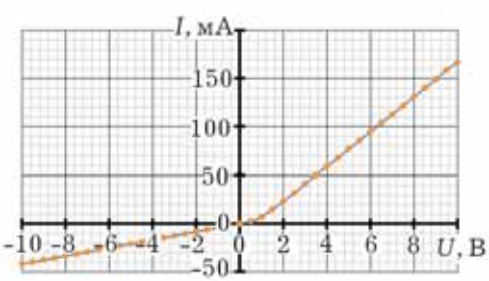


Рис. 15

Анализируя график на рис. 15, можно сказать следующее:

так как при изменении знака напряжения ВАХ изменяется, а также проявляет нелинейную зависимость при подключении 1(+) - 2(–), то между выводами включен диод;

поскольку ток есть при обеих полярностях напряжения, причём в обратном подключении зависимость линейна, то параллельно диоду включён резистор;

практически линейная зависимость, выявленная ВАХ при прямом подключении, свидетельствуют о том, что последовательно с диодом включён также резистор.

Так что схема между выводами 1 и 2 имеет вид, показанный на рис. 16.

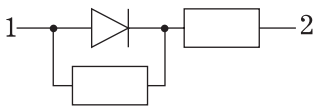


Рис. 16

(Это лишь одна из возможных схем, например, полученной ВАХ удовлетворяет и схема, представленная на рис. 17.)

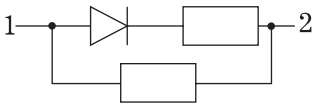
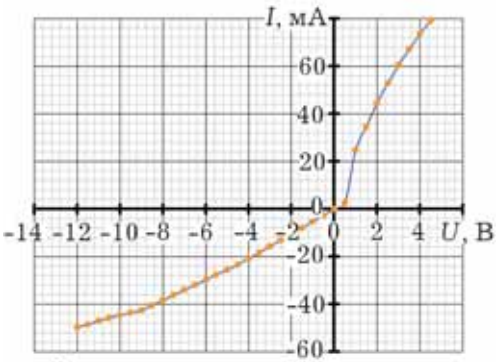


Рис. 17

Аналогично предыдущему случаю получаем таблицу 3 и строим ВАХ для выводов 1–3 (рис. 18), анализируя которую, можно сделать вывод, что между клеммами 1–3 есть диод с параллельно включённым резистором и что последовательно с ними соединена лампочка, о чём свидетельствует искривлённость ВАХ как при прямом, так и обратном направлении тока.

Таблица 3

U, В	I, мА	U, В	I, мА
-12,0	-49,8	-3,5	-18,3
-11,5	-48,6	-3,0	-15,7
-11,0	-46,9	-2,5	-13,1
-10,5	-45,7	-2,0	-10,5
-10,0	-44,6	-1,5	-7,9
-9,5	-43,5	-1,0	-5,3
-9,0	-42,6	-0,5	-2,6
-8,5	-40,5	0,0	0,0
-8,0	-38,4	0,5	2,7
-7,5	-36,2	1,0	24,7
-7,0	-34,0	1,5	34,6
-6,5	-31,9	2,0	44,4
-6,0	-29,7	2,5	52,8
-5,5	-27,5	3,0	60,5
-5,0	-25,5	3,5	67,2
-4,5	-23,3	4,0	73,6
-4,0	-20,8	4,5	79,3



Вольамперная характеристика для выводов 1-3

Рис. 18

Таким образом, схема между выводами 1 и 3 имеет следующий вид:

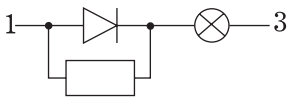


Рис. 19

В данном случае также возможна альтернативная схема – рис. 20.

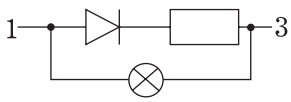
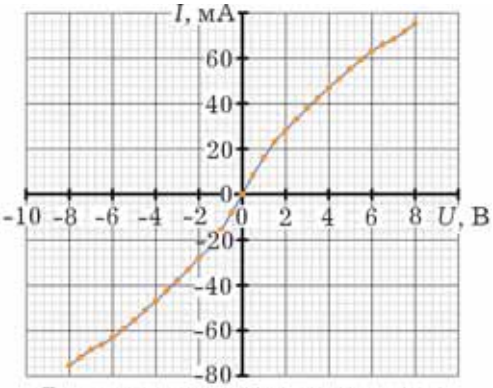


Рис. 20

Так же – на основе таблицы 4 – получаем ВАХ для выводов 2–3 (рис. 21).

Таблица 4

U, В	I, мА	U, В	I, мА
-8,0	-75,4	0,0	0,0
-7,5	-71,8	0,5	8,4
-7,0	-68,3	1,0	16,2
-6,5	-66,1	1,5	23,1
-6,0	-63,2	2,0	28,0
-5,5	-59,3	2,5	32,9
-5,0	-55,4	3,0	37,8
-4,5	-50,9	3,5	42,3
-4,0	-46,9	4,0	46,9
-3,5	-42,3	4,5	50,9
-3,0	-37,8	5,0	55,4
-2,5	-32,9	5,5	59,3
-2,0	-28,0	6,0	63,2
-1,5	-23,1	6,5	66,1
-1,0	-16,2	7,0	68,3
-0,5	-8,4	7,5	71,8
0,0	0,0	8,0	75,4



Вольтамперная характеристика для выводов 2-3

Рис. 21

Из анализа графиков следует, что в цепи нет диодов, но присутствует лапочка, включённая последовательно с резистором (иначе ВАХ шла бы круче при $U \approx 0$, так как сопротивление лампочки в холодном состоянии всего несколько Ом). Таким образом, схема между выводами 2 и 3 имеет вид, представленный на рис. 22.

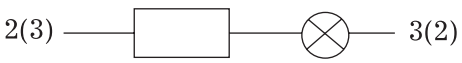


Рис. 22

Действие 3. Обобщая данные, полученные в процессе исследования, делаем вывод, что одна из возможных схем чёрного ящика имеет следующий вид (рис. 23):

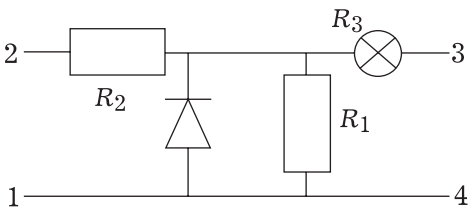


Рис. 23

Действие 4. Найдём характеристики входящих в цепь ЧЯ элементов. Обозначим сопротивления резисторов соответственно R_1 и R_2, сопротивление лампочки R_3. Тогда, учитывая таблицу 1 сопротивлений, придём к системе:

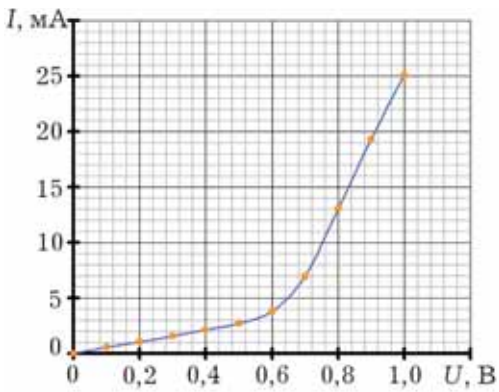
$$\begin{cases} R_1 + R_2 = 235, \\ R_1 + R_3 = 190, \\ R_2 + R_3 = 60. \end{cases}$$

Отсюда $R_1 \approx 182$ Ом, $R_2 \approx 52$ Ом, $R_3 \approx 7$ Ом.

Выясним, чему равно открывающее напряжение диода. Для этого построим теперь ВАХ для выводов 1-3 (рис. 24) с «шагом» 0,1 В (так как сопротивление лампочки в холодном состоянии примерно равно нулю) по данным таблицы 5.

Таблица 5

U, В	I, мА
0,0	0,00
0,1	0,55
0,2	1,05
0,3	1,57
0,4	2,12
0,5	2,72
0,6	3,82
0,7	6,93
0,8	13,05
0,9	19,30
1,0	25,10



Вольтамперная характеристика для выводов 1-3 вблизи нуля

Рис. 24

Из графика видно, что открывающее напряжение $U_{откр} \approx 0{,}6$ В.

Заключение

Мне хотелось бы поблагодарить мою учительницу по физике *Ахметову Юлию Николаевну* (преподаватель физики МОУ Лицей, г. Нижневартовск, Тюменская обл.) за полученные от неё знания при подготовке к физическим олимпиадам. Эти знания и легли в основу данной статьи, работу над которой я начал под её руководством ещё школьником весной 2007 г., а закончил, став студентом МФТИ.