

## Лабораторная работа №4

### Исследование нелинейной цепи постоянного тока

Цель работы – с помощью электронной лаборатории **Electronics Workbench** исследовать параллельное и последовательное соединение элементов нелинейной цепи и режимы работы стабилизатора напряжения.

#### Краткие сведения из теории

Нелинейной называется цепь, содержащая хотя бы один **нелинейный элемент** вольт-амперная характеристика (ВАХ) которого отличается от прямой линии. У таких элементов ток и напряжение изменяются непропорционально, сопротивление их непостоянно, поэтому рассмотренные ранее методы расчёта линейных электрических цепей непригодны. Здесь применяются графические методы расчёта с построением результирующих ВАХ.

При **параллельном** соединении элементов нелинейной цепи они под одним напряжением, их токи складываются,  $I_1 + I_2 = I$ ,  $ab + ac = ad$  (рисунок 1).

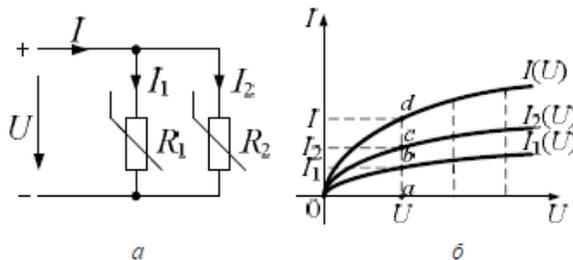


Рисунок 1 – Схема (а) и графическое построение результирующей ВАХ (б) при параллельном соединении нелинейных элементов

При **последовательном** соединении элементов нелинейной цепи по ним протекает один ток, их напряжения складываются  $U_1 + U_2 = U$ ,  $ab + ac = ad$  (рисунок 2).

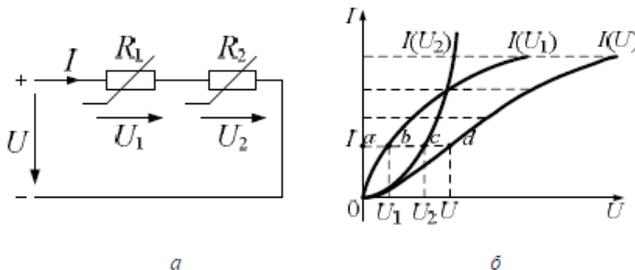


Рисунок 2 – Схема (а) и графическое построение результирующей ВАХ (б) при последовательном соединении нелинейных элементов

Применение графических методов расчёта рассмотрим на примере стабилизатора напряжения.

**Пример 17.2.** Для стабилизации напряжения на приемнике параллельно ему присоединили стабилитрон (рис. 17.8), ВАХ которого  $I_1(U_H)$  задана (рис. 17.9). Определить пределы изменения напряжения приемника  $U_H$ , если напряжение источника питания  $U = 12$  В изменяется в пределах  $\pm 10\%$ . Сопротивление  $R_1 = 1,2$  кОм,  $R_H = 10$  кОм.

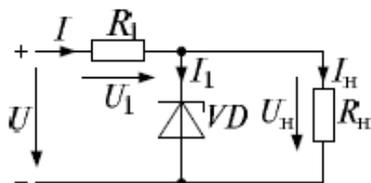


Рис. 17.8. Схема нелинейной цепи

**Решение.** Строим результирующую ВАХ смешанного соединения резисторов в соответствии с методикой, изложенной на с. 322–324. Для этого на графике с ВАХ стабилитрона достраиваем ВАХ резистора и ВАХ приемника. Затем строим результирующую ВАХ  $I(U_H)$  параллельного соединения стабилитрона  $VD$  и резистора приемника  $R_H$ , далее – результирующую ВАХ  $I(U)$  последовательного соединения резистора  $R_1$  и эквивалентного нелинейного элемента  $R_{H/VD}$ .

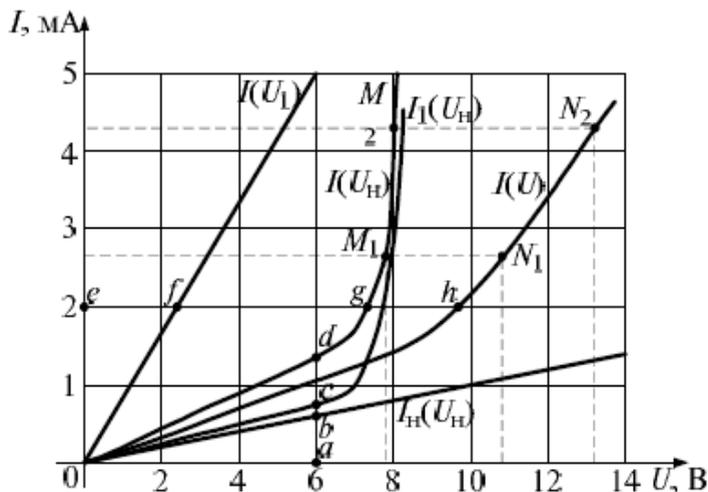


Рис. 17.9. Вольт-амперные характеристики цепи

Чтобы выполнить указанные преобразования, воспользуемся методом построения результирующих ВАХ для параллельного и последовательного соединений резисторов.

Вольт-амперные характеристики линейных элементов  $R_1$  и  $R_n$  строим, задавшись произвольными значениями токов:  $I = 5$  мА. Тогда  $U_1 = IR_1 = 5 \cdot 10^{-3} \times 1,2 \cdot 10^3 = 6$  В;  $I_n = 1$  мА, тогда  $U_n = I_n R_n = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 = 10$  В.

По двум точкам (0; 0 и 5 мА; 6 В) проводим прямую линию и получаем характеристику  $I(U_1)$ . Аналогично по двум точкам (0; 0 и 1 мА; 10 В) строим ВАХ  $I_n(U_n)$  (рис. 17.9).

Зависимость  $I(U_n)$  для параллельного соединения получаем суммированием ординат ВАХ стабилитрона  $I_1(U_n)$  и приемника  $I_n(U_n)$ , соответствующих выбранному напряжению. Например, при  $U_n = 6$  В суммируем отрезки  $ab$  и  $ac$  и получаем точку  $d$  характеристики  $I(U_n)$ . Аналогично получаем и для других значений  $U_n$ .

Для последовательного соединения зависимость  $I(U)$  определяем суммированием абсцисс характеристик  $I(U_1)$  и  $I(U_n)$ , соответствующих выбранному току. Например, при  $I = 2$  мА суммируем отрезки  $ef$  и  $eg$  и получаем точку  $h$  характеристики  $I(U)$ . Аналогично поступаем, выбирая аналогичные значения для  $I$ . Кривая  $I(U)$  является результирующей ВАХ всей цепи.

По условию задачи напряжение  $U$  изменяется в пределах  $\pm 10$  %, т. е. от  $0,9U = 0,9 \cdot 12 = 10,8$  В до  $1,1U = 1,1 \cdot 12 = 13,2$  В.

Чтобы определить, в каких пределах при этом изменяется  $U_n$ , воспользуемся двумя характеристиками:  $I(U)$  и  $I(U_n)$ .

По ВАХ  $I(U)$  при  $U = 10,8$  В  $I = 2,7$  мА (точка  $N_1$ );  
при  $U = 13,2$  В  $I = 4,3$  мА (точка  $N_2$ ).

По ВАХ  $I(U_n)$  при  $I = 2,7$  мА  $U_n = 7,8$  В (точка  $M_1$ );  
при  $I = 4,3$  мА  $U_n = 8$  В (точка  $M_2$ ).

Изменение напряжения на нагрузке

$$\Delta U_n = 8 - 7,8 = 0,2 \text{ В,}$$

или в процентном выражении к среднему напряжению на нагрузке

$$\Delta U_{n, \text{cp}} = \frac{0,2}{7,9} \cdot 100 \% \approx 2,5 \%$$

Таким образом, при колебаниях напряжения источника на  $\pm 10$  % напряжение на нагрузке изменяется только на  $\pm 1,25$  %, т. е. в 8 раз меньше.

Чтобы понять как ведёт себя напряжение  $U_n$  стабилизированного источника при изменении сопротивления нагрузки  $R_n$  используют его внешнюю (нагрузочную) характеристику  $U_n(I_n)$ , её рабочий участок.

## Порядок выполнения работы

1 Запустить электронную лабораторию нажатием на иконку .

2 Выбрать элементы в соответствии со схемой исследования нелинейной цепи стабилизатора напряжения рисунка 3 и разместить их в рабочем поле (источник – из Sources, резистор, реостат и переключатель – из Basic, стабилитрон – из Diodes, вольтметры и амперметры – из Indicators. Повернуть вольтметр и реостат. Собрать схему.

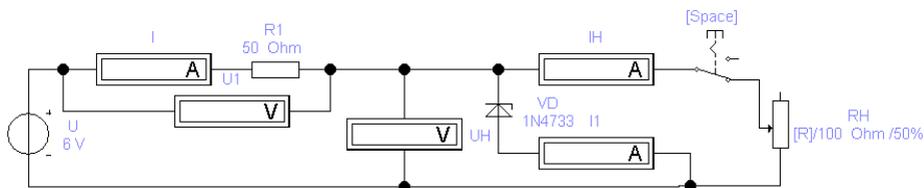


Рисунок 3 – Схема исследования нелинейной цепи стабилизатора напряжения

3 Назвать и установить напряжение источника  $U$ , 6 В;  $R_1$ , 50 Ом;  $R_H$ , 100 Ом (через щелчок правой кнопкой, Component Properties, label и value OK). Назвать вольтметры и амперметры. Назвать стабилитрон  $VD$ , далее Models, Library, 1n, 1N4733, OK.

4 Установить  $R$  100 % (клавишами Shift+R, язык EN) и включить  $I$ . Измерить напряжения и токи, записать их в таблицу 1.

Таблица 1. Напряжения и токи при изменении напряжения питания  $U$

Напряжение источника $U, В$	6	8	10	12	14
Общий ток цепи $I$ , мА					
Напряжение на $R_1$ т.е. $U_1, В$					
Напряжение на нагрузке $U_H, В$					
Ток нагрузки $I_H$ , мА					
Ток стабилитрона $I_1$ , мА					

5 Увеличивая напряжение источника  $U$  (щелчок правой кнопкой, Component Properties, value OK) до 8; 10; 12; 14 В, заполнить таблицу 1.

6 Построить в одной системе координат графики ВАХ резистора  $R_1$   $I(U_1)$ ; стабилитрона  $VD$   $I_1(U_H)$ , нагрузочного реостата  $R_H$   $I_H(U_H)$ . Горизонтальный масштаб напряжений принять 1 В / см, вертикальный масштаб токов 10 мА / см. Рисунок займёт страницу тетради.

7 В этой же системе координат построить (другим цветом) график ВАХ параллельно соединённых стабилитрона и нагрузочного реостата  $I(U_H)$ . Убедиться, что он получается сложением ординат графиков  $I_1(U_H)$  и

$I_H(U_H)$ . Для этого через точку **b** на графике  $I_H(U_H)$  с координатами 5,6 В; 56 мА провести пунктирную вертикальную линию. При пересечении оси абсцисс получим точку **a**, при пересечении графика ВАХ стабилитрона  $I_1(U_H)$  получим точку **c**, при пересечении графика  $I(U_H)$  точку **d**. Убедиться что  $ab + ac = ad$ .

8 Построить (другим цветом) график ВАХ всей цепи  $I(U)$ . Убедиться, что он получается сложением абсцисс графиков  $I(U_H)$  и  $I(U_1)$ . Для этого через точку **d** (она же **g**) на графике  $I(U_H)$  провести пунктирную горизонтальную линию. При пересечении оси ординат получим точку **e**, при пересечении графика  $I(U_1)$  получим точку **f**, при пересечении графика  $I(U)$  точку **h**. Убедиться что  $eg + ef = eh$ .

9 Увидеть принцип графического расчёта цепи: из точки входного напряжения 12 В на оси абсцисс поднимаем вертикальную линию до графика  $I(U)$ , ищем входной ток  $I$ . Из полученной точки **h** проводим влево горизонтальную линию до графика  $I(U_H)$ , ищем выходное напряжение  $U_H$ . Из полученной точки **d** (она же **g**) опускаем линию до графика  $I_1(U_H)$  и получаем ток стабилитрона  $I_1$  (точка С) продляем вниз до  $I_H(U_H)$  (точка **b**) и получаем ток нагрузки  $I_H$ , далее вниз и на оси абсцисс получаем напряжение нагрузки  $U_H$ .

10 Исследовать работу стабилизатора при колебаниях напряжения источника питания  $\pm 10\%$ . Установить напряжения источника  $U_{\text{МИН}}$  соответствующее снижению на  $-10\%$  от номинального 12 В, т. е. до 10.8 В (десятичная точка), измерить  $U_{H \text{ МИН}}$ . Занести в таблицу 2. Затем установить напряжения источника  $U_{\text{МАКС}}$  соответствующее увеличению его на  $+10\%$  т. е. до 13.2 В (десятичная точка), измерить  $U_{H \text{ МАКС}}$ . Определить во сколько раз колебания напряжения на нагрузке меньше чем колебания напряжения источника питания по формуле

$$k = (U_{\text{МАКС}} - U_{\text{МИН}}) / (U_{H \text{ МАКС}} - U_{H \text{ МИН}}).$$

Таблица 2. Работа стабилизатора при колебаниях входного напряжения

$U_{\text{МИН}}, \text{В}$	$U_{H \text{ МИН}}, \text{В}$	$U_{\text{МАКС}}, \text{В}$	$U_{H \text{ МАКС}}, \text{В}$	<b>k</b>
10.8 В		13.2 В		

11 Исследовать работу стабилизатора напряжения при уменьшении сопротивления нагрузочного реостата (снять его внешнюю нагрузочную характеристику). Для этого установить  $U$  12 В и разомкнуть переключатель клавишей Пробел. Измерить напряжение холостого хода при  $R_H \infty$ , занести в таблицу 3. Изменяя реостат заполнить таблицу 3.

Таблица 3 – Работа стабилизатора при уменьшении сопротивления реостата

Сопротивление реостата %	$\infty$	100	80	60	40	30
Напряжение на нагрузке $U_H, В$						
Ток нагрузки $I_H, мА$	-					
Ток стабилизатора $I_1, мА$						

12 Построить график зависимости напряжения стабилизатора от тока нагрузки  $U_H(I_H)$  и проанализировать его, определить рабочий участок.

Увидеть по таблице, что напряжение поддерживается стабильным, пока есть достаточный ток стабилизатора.

### Содержание отчёта

- 1 Наименование и цель работы.
- 2 Схема исследования с изображением амперметров и вольтметров кружочками.
- 3 Таблица 1.
- 4 Графические вольт-амперные характеристики и проверка правильности их сложения.
- 5 Определение коэффициента стабилизации  $k$ , (таблица 2).
- 6 Таблица 3.
- 7 График внешней (нагрузочной) характеристики стабилизатора.
- 8 Вывод, до каких пор напряжение поддерживается стабильным при уменьшении сопротивления реостата?
- 9 Заключение по работе.

### Контрольные вопросы

- 1 Как выглядит ВАХ стабилизатора?
- 2 Как складываются ВАХ элементов при параллельном соединении?
- 3 Как складываются ВАХ элементов при последовательном соединении?
- 4 В чём заключается принцип графического расчёта цепи?
- 5 Что показывает коэффициент стабилизации  $k$ ?
- 6 Как выглядит внешняя (нагрузочная) характеристика стабилизатора?