

## Лабораторная работа

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы:** 1) ознакомление с вольт-амперными характеристиками нелинейных элементов; 2) изучение графического метода расчета нелинейных электрических цепей; 3) исследование параметрического стабилизатора напряжения.

#### Общие сведения

**Нелинейными** называются элементы электрических цепей, сопротивления которых изменяются при изменении проходящего по ним тока или приложенного напряжения. К нелинейным элементам относятся разнообразные электронные, полупроводниковые и ионные приборы, лампы накаливания, электрическая дуга и др.

Важнейшей характеристикой нелинейных элементов является **вольт-амперная характеристика (ВАХ)**, представляющая зависимость напряжения элемента от проходящего по нему тока  $U(I)$  или  $I(U)$ . Для линейных элементов, у которых  $R = \text{const}$ , зависимость  $I(U)$  линейная и ВАХ представляется прямой линией (рис. 1). Поскольку у нелинейных элементов с изменением тока или напряжения сопротивление изменяется, то их ВАХ нелинейны.

В качестве примера на рис. 2 приведены ВАХ стабилитрона Д815А (кривая 1) и лампы накаливания (кривая 2).

Нелинейные элементы имеют широкое распространение, так как позволяют решать многие технические задачи: преобразование переменного тока в постоянный ток и наоборот, стабилизацию напряжения и тока, усиление сигналов, вычислительные операции и т.д.

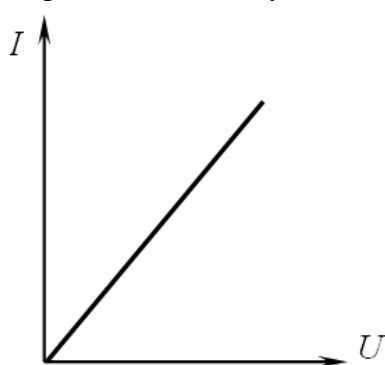


Рис. 1

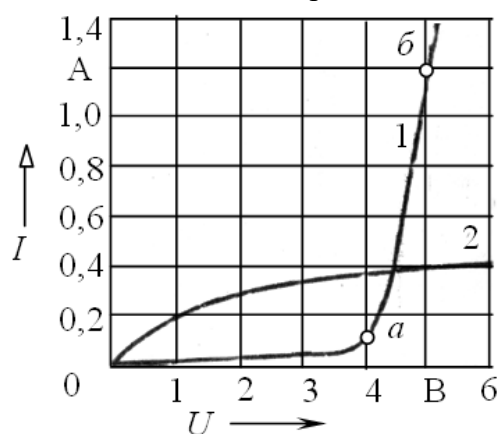


Рис. 2

Электрическую цепь, содержащую хотя бы один нелинейный элемент, называют нелинейной. К нелинейным цепям применимы закон Ома и законы Кирхгофа. Однако расчет нелинейных цепей значительно труднее, чем линейных, так как кроме токов и напряжений, подлежащих обычно определению, неизвестными являются зависящие от них сопротивления нелинейных элементов.

Широкое распространение для анализа и расчета нелинейных цепей получил графический метод преобразований, основанный на замене отдельных участков, а затем всей цепи эквивалентными сопротивлениями, имеющими соответственно эквивалентные ВАХ. При расчете нелинейных цепей должны быть известны ВАХ нелинейных элементов. Эти характеристики могут быть заданы в виде графиков или таблиц, они также легко получаются экспериментальным путем.

На рис. 3, а приведена схема нелинейной цепи, состоящей из двух последовательно соединенных нелинейных элементов  $R_1(I)$  и  $R_2(I)$  с заданными на рис. 3, б ВАХ  $I(U_1)$  и  $I(U_2)$ .

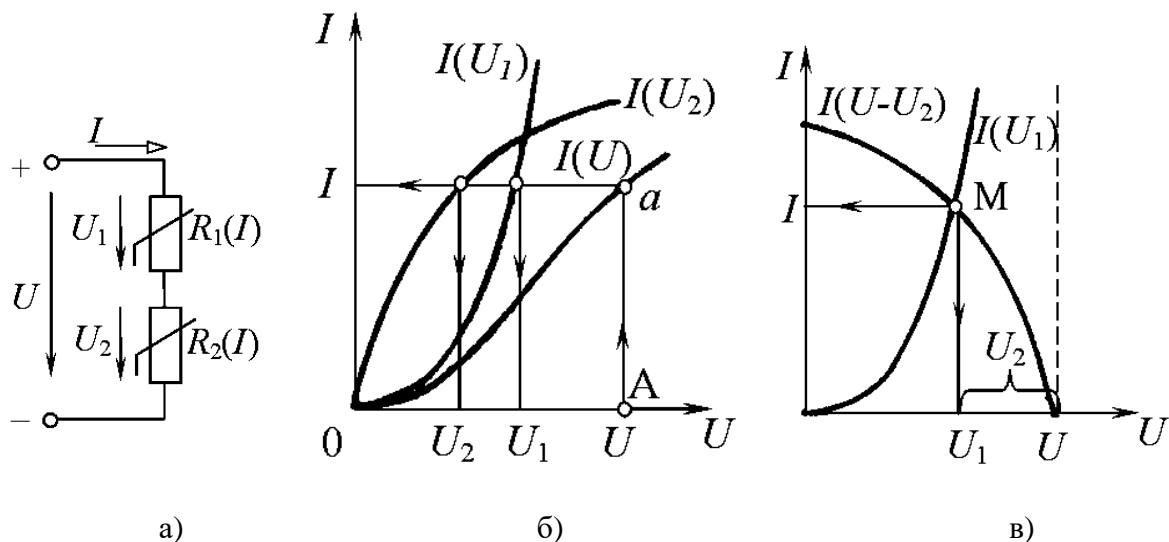


Рис. 3

Так как ток обоих элементов цепи одинаков, а приложенное напряжение  $U = U_1 + U_2$ , то для построения эквивалентной характеристики цепи  $I(U)$  нужно просуммировать абсциссы (напряжения) заданных кривых  $I(U_1)$  и  $I(U_2)$  при определенных значениях тока. Пользуясь характеристиками рис. 3, б, можно решать различные для данной цепи задачи. Например, если задано напряжение  $U$  и требуется определить ток  $I$ , напряжения  $U_1, U_2$ , то откладываем заданное значение  $U$  на оси абсцисс (точка А) и проводим вертикаль до пересечения с ВАХ  $I(U)$ . Из точки пересечения  $a$  проводим горизонталь, пересекающую графики  $I(U_1), I(U_2)$ , ось токов, и находим искомые величины.

Расчет цепи рис. 3, а можно выполнить другим методом, основанным на графическом решении двух уравнений. Допустим, что ВАХ первого элемента выражается уравнением  $I(U_1)$ . Для получения второго уравнения, связывающего те же величины, воспользуемся вторым законом Кирхгофа, согласно которому  $U_1 = U - U_2$ , тогда получим второе уравнение  $I(U - U_2)$ . Для построения зависимости  $I(U - U_2)$ , так называемой опрокинутой характеристики, необходимо для каждого значения тока из постоянной абсциссы  $U$  вычесть абсциссу характеристики  $I(U_2)$  (рис. 3, в). Решение уравнений  $I(U_1)$  и  $I(U - U_2)$  определяется точкой М пересечения графиков. Перпендикуляры, опущенные на оси координат, определяют напряжения  $U_1, U_2$  и ток  $I$ . Рассмотренный метод особенно удобен, когда один из элементов линейный. Тогда опрокинутую характеристику строят по двум точкам.

При параллельном соединении нелинейных элементов (рис. 4, а) с заданными ВАХ  $I_1(U)$  и  $I_2(U)$  (рис. 4, б) напряжение одинаково для обоих элементов, а ток  $I = I_1 + I_2$ . Поэтому для построения общей характеристики  $I(U)$  нужно при произвольных значениях напряжения  $U$  просуммировать ординаты (токи) характеристик  $I_1(U)$  и  $I_2(U)$ .

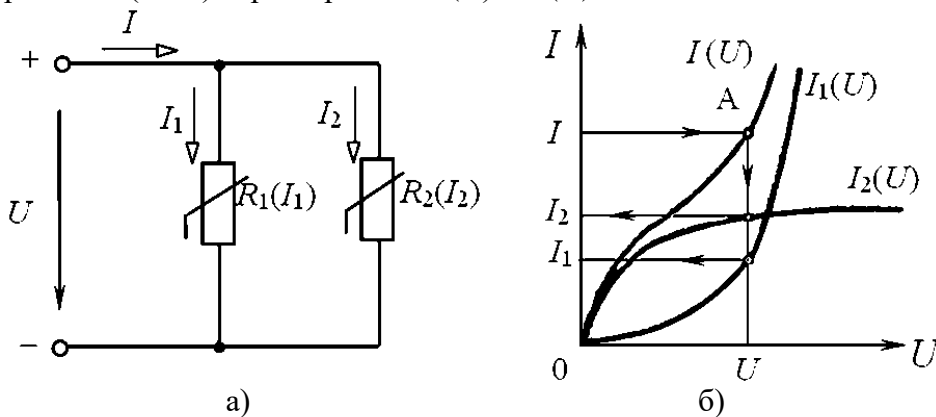


Рис. 4

Последовательность расчета цепи рис. 4, а при заданном токе  $I$  (точка А) показана стрелками на рис. 4, б.

При смешанном соединении нелинейных элементов результирующая характеристика цепи строится путем поочередного сложения отдельных характеристик в зависимости от схемы соединений цепи.

Для иллюстрации одного из вариантов использования нелинейных элементов в данной работе рассматривается параметрический стабилизатор напряжения (СН), схема которого приведена на рис. 5.

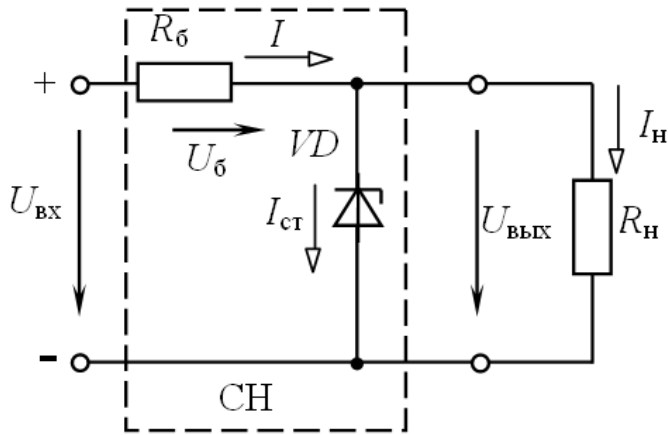


Рис. 5

Нелинейным элементом, служащим для стабилизации напряжения, является полупроводниковый стабилитрон  $VD$ , параметр которого  $R$  изменяется с изменением  $U_{ст}$  или  $I_{ст}$ . ВАХ стабилитрона дана на рис. 2 (кривая 1). Рабочий участок ВАХ – участок  $ab$ . В стабилизаторе напряжения включен балластный резистор  $R_6$ . Нагрузка  $R_n$  подключается параллельно стабилитрону.

Принцип действия стабилизатора заключается в следующем. С ростом напряжения  $U_{вх}$  увеличиваются токи  $I, I_{ст}, I_n$  и напряжение  $U_{ввых}$ . Но из ВАХ стабилитрона очевидно, что даже незначительное увеличение  $U_{ввых} = U_{ст}$  сопровождается значительным ростом тока  $I_{ст}$ . Это приводит к росту тока  $I = I_{ст} + I_n$  и падению напряжения  $U_6 = R_6 I_6$ . В результате почти все приращение напряжения  $U_{вх}$  равно приращению напряжения на балластном резисторе, а выходное напряжение  $U_{ввых}$  (стабилитрона) практически постоянно (т.е. с ростом  $I_{ст}$  уменьшается  $R_{ст}$ , а произведение  $R_{ст} I_{ст} = U_{ст} = U_{ввых} \approx const$ ).

Рассмотрим методику расчета цепи рис. 5 сначала в режиме холостого хода ( $R_n = \infty; I_n = 0; I = I_{ст}$ ). На рис. 6, а расчет выполнен путем построения эквивалентной характеристики цепи  $I(U_{вх})$  (сложением ВАХ стабилитрона  $I_{ст}(U_{ст})$  и балластного резистора  $I_6(U_6)$ ). При заданном напряжении  $U_{вх}$  графически определяются ток  $I$ , напряжения  $U_{ввых}$  и  $U_6$ , построения для двух предельных значений  $U_{вх1}, U_{вх2}$  показаны стрелками. Диапазон изменения входного напряжения  $U_{вх1} \dots U_{вх2}$  при стабилизированном  $U_{ввых}$  определяется рабочим участком стабилитрона  $ab$ .

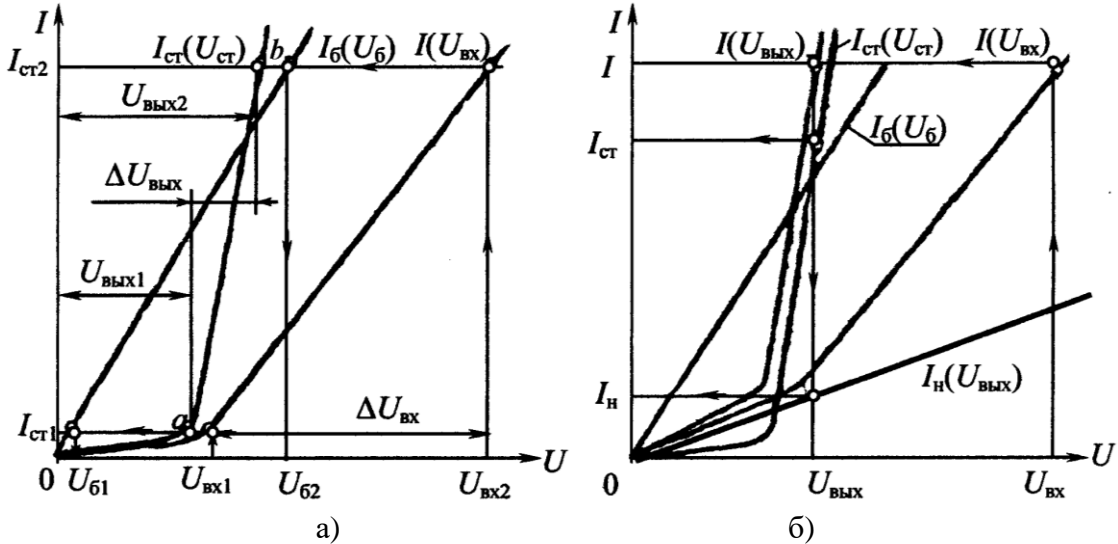


Рис. 6

Для расчета стабилизатора под нагрузкой ( $R_H \neq \infty; I_H \neq 0; I = I_{CT} + I_H$ ) необходимо построить ВАХ стабилизатора  $I_{CT}(U_{CT})$ , балластного резистора  $I_6(U_6)$  и нагрузки  $I_H(U_{ВЫХ})$ . Затем выполним графическое решение смешанного соединения трех элементов (см. рис. 5) методом эквивалентных преобразований. Вначале заменим параллельно соединенные стабилизатор и нагрузку эквивалентным элементом с ВАХ  $I(U_{ВЫХ})$ . Для этого просуммируем ВАХ стабилизатора и нагрузки по оси токов (рис. 6, б). Эквивалентную ВАХ всей цепи получим сложением по оси напряжения двух графиков  $I_6(U_6)$  и  $I(U_{ВЫХ})$ , так как балластный резистор и эквивалентный элемент с ВАХ  $I(U_{ВЫХ})$  включены последовательно. Графический расчет выполняем в такой последовательности (см. рис. 6, б): по оси напряжения отмечаем значение  $U_{ВХ}$  и по ВАХ  $I(U_{ВХ})$  находим ток  $I$ , затем по ВАХ  $I(U_{ВЫХ})$  определяем  $U_{ВЫХ} = U_{CT}$ , которое, в свою очередь, позволяет найти токи  $I_{CT}$ ,  $I_H$  по графикам  $I_{CT}(U_{CT})$  и  $I_H(U_{ВЫХ})$ .

Важнейшей характеристикой стабилизатора напряжения является зависимость  $U_{ВЫХ}(U_{ВХ})$ , которую можно получить на основе выполненного графического решения или экспериментально.

Стабилизирующее действие стабилизаторов оценивается коэффициентом стабилизации:

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ.ср}}{\Delta U_{ВЫХ} / U_{ВЫХ.ср}} = \frac{(U_{ВХ.2} - U_{ВХ.1}) / U_{ВХ.ср}}{(U_{ВЫХ.2} - U_{ВЫХ.1}) / U_{ВЫХ.ср}},$$

где  $U_{ВХ.ср} = \frac{U_{ВХ.1} + U_{ВХ.2}}{2}$ ;  $U_{ВЫХ.ср} = \frac{U_{ВЫХ.1} + U_{ВЫХ.2}}{2}$ .

### Предварительное задание к эксперименту

Выполнить графический расчет параметрического стабилизатора напряжения, схема которого приведена на рис. 5, в режиме холостого хода и под нагрузкой. Стабилизатор выполнен на основе стабилизатора Д815А, ВАХ которого изображена на рис. 2 (кривая 1), и балластного резистора сопротивлением  $R_6$ , заданным в табл. 1.

В качестве нагрузки, согласно варианту в табл. 1, используется резистор сопротивлением  $R_H = 20$  Ом или лампа накаливания ЛН (зависимость  $I(U)$  лампы дана на рис. 2 (кривая 2)).

Таблица 1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_6$ , Ом	3	3	4	4	5	5	6	6
Нагрузка	$R_H$	ЛН	$R_H$	ЛН	$R_H$	ЛН	$R_H$	ЛН

Для этого построить в общей системе координат ВАХ стабилизатора  $I_{CT}(U_{CT})$ , резистора  $R_6$   $I_6(U_6)$ , нагрузки  $I_H(U_{ВЫХ})$  (построения выполнять отдельно для режима холостого хода, когда на графике совмещаются две кривые  $I_{CT}(U_{CT})$  и  $I_6(U_6)$ , и для нагрузочного режима, когда совмещаются все три ВАХ) и путем дополнительных графических построений определить:

- 1) диапазон изменения входного напряжения  $U_{ВХ.1} \dots U_{ВХ.2}$ , соответствующий стабилизированному (почти постоянному) значению выходного напряжения  $U_{ВЫХ.1} \dots U_{ВЫХ.2}$ ;
- 2) коэффициент стабилизации  $K_{CT}$ ;
- 3) ток балластного резистора  $I$ , напряжение на нем  $U_6$ , выходное и входное напряжения стабилизатора при условии, что ток стабилизатора равен наибольшему значению  $I_{CT.макс} = 1,2$  А.

Результаты расчетов всех пунктов записать в табл. 2

Таблица 2

		$U_{ВХ.1} \dots U_{ВХ.2}$	$U_{ВЫХ.1} \dots U_{ВЫХ.2}$	$K_{CT}$	$I_{CT.макс} = 1,2$ А			
					$I$ , А	$U_6$ , В	$U_{ВЫХ}$ , В	$U_{ВХ}$ , В
Режим холостого хода	Графический расчет							
	Эксперимент							
Нагрузочный режим	Графический расчет							
	Эксперимент							

## Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 7

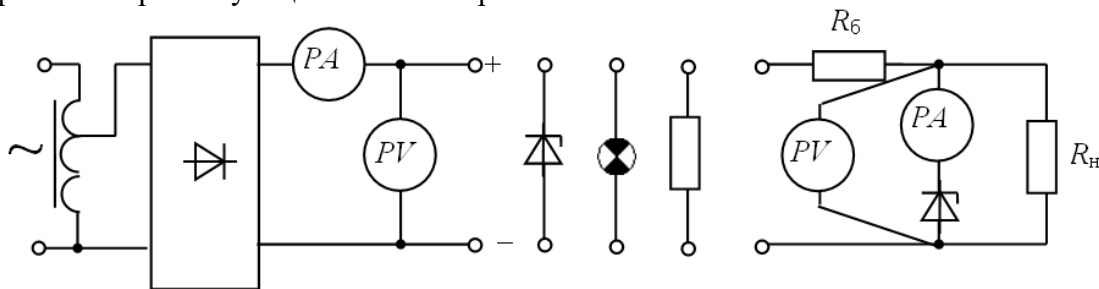


Рис. 7

2. Снять вольт-амперную характеристику стабилитрона Д815А, изменяя ток от нуля до наибольшего значения  $I_{ст.маx} = 1,2$  А. Определить пределы изменения тока, соответствующие стабилизированному напряжению. Результаты 5...6 измерений записать в табл. 3. Рассчитать статическое сопротивление стабилитрона.

Таблица 3

Стабилитрон			Лампа накаливания			Нагрузочный резистор			Стабилизатор			
									холостой ход		под нагрузкой	
$U, В$	$I, А$	$R, Ом$	$U, В$	$I, А$	$R, Ом$	$U, В$	$I, А$	$R, Ом$	$U_{вых}, В$	$U_{вх}, В$	$U_{вых}, В$	$U_{вх}, В$

3. Аналогично п. 2 снять ВАХ лампы накаливания (для четных вариантов) или нагрузочного резистора  $R_n$  (для нечетных вариантов), изменяя напряжение от нуля до 6 В.

4. По результатам измерений пунктов 2 и 3 построить ВАХ в общей системе координат с аналогичными кривыми, которые ранее построены по данным каталога. Экспериментальные и каталожные ВАХ изобразить различным цветом.

5. Подключить к источнику энергии стабилизатор напряжения и, изменяя входное напряжение от нуля до максимального значения, соответствующего току стабилитрона  $I_{ст.маx} = 1,2$  А, снять зависимость  $U_{вых}(U_{вх})$  для холостого хода и под нагрузкой. Результаты измерений записать в табл. 3 и построить совмещенные графики  $U_{вых}(U_{вх})$ . Указать на графиках диапазон изменения  $U_{вх.1} \dots U_{вх.2}$ , соответствующий стабилизированному выходному напряжению  $U_{вых.1} \dots U_{вых.2}$ , рассчитать коэффициент стабилизации  $K_{ст}$  и записать полученные значения в табл. 2.

6. Установить предельный режим работы стабилизатора (при токе стабилитрона  $I_{ст.маx} = 1,2$  А), измерить и записать в табл. 2 значения  $I, U_б, U_{вых}, U_{вх}$ . Сравнить результаты с данными графического расчета.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема параметрического стабилизатора напряжения под нагрузкой (см. рис. 5).
3. Графический расчет стабилизатора в режиме холостого хода; под нагрузкой (показать каталожные и экспериментальные ВАХ стабилитрона и нагрузки, рабочий диапазон стабилизатора).
4. Схема электрической цепи для проведения эксперимента (см. рис. 7).
5. Таблицы результатов расчета и эксперимента (см. табл. 2 и 3).
6. Графики зависимостей  $U_{вых}(U_{вх})$  стабилизатора в режиме холостого хода и под нагрузкой с указанием диапазона стабилизации напряжения.

7. Выводы о специфике расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока.

### Контрольные вопросы

1. Какие элементы электрических цепей и электрические цепи называются нелинейными? Приведите примеры.
2. Как выглядят ВАХ стабилитрона, лампы накаливания, резистора? Какова зависимость их статического сопротивления от приложенного напряжения?
3. Каков принцип работы параметрического стабилизатора напряжения (см. рис. 5)?
4. В чем сущность графического метода расчета нелинейных цепей?
5. Поясните графический расчет стабилизатора напряжения в режиме холостого хода и под нагрузкой.
6. Что представляет собой коэффициент стабилизации стабилизатора напряжения? Как его определили расчетным и опытным путем?
7. Как зависит диапазон изменения  $\Delta U_{\text{вх}}$  стабилизатора напряжения от величины сопротивления  $R_{\text{б}}$ , если  $U_{\text{вых}} = \text{const}$ ?
8. Как зависит коэффициент стабилизации  $K_{\text{ст}}$  от сопротивления нагрузки?