

## Занятие 2

# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ, СТАБИЛИТРОНЫ И ТИРИСТОРЫ

Полупроводниковым диодом называют прибор, который имеет два вывода и содержит один (или несколько) электронно-дырочных переходов.

Электронно-дырочный переход это тонкий слой между двумя частями полупроводникового кристалла, в котором одна часть имеет электронную проводимость (N-область), а другая часть имеет дырочную проводимость (P-область).

*Электронно-дырочный переход называют p-n –переходом.*

Электронную проводимость имеет, например, четырехвалентный кристалл кремния с донорной примесью пятивалентного фосфора или мышьяка.

Дырочную проводимость имеет кристалл кремния с акцепторной примесью трехвалентного индия.

Дырка является фиктивным носителем заряда, образуется в кристалле на месте отсутствующего электрона, имеет положительный заряд, равный по величине заряду электрона.

Полупроводник без примеси имеет собственную удельную электропроводность  $\sigma_n \approx 10^2 \dots 10^{-8} \text{ См} / \text{ м}$ , проводник  $\sigma_m \approx 10^4 \dots 10^8 \text{ См} / \text{ м}$ , диэлектрик  $\sigma_d < 10^{-8} \text{ См} / \text{ м}$ .

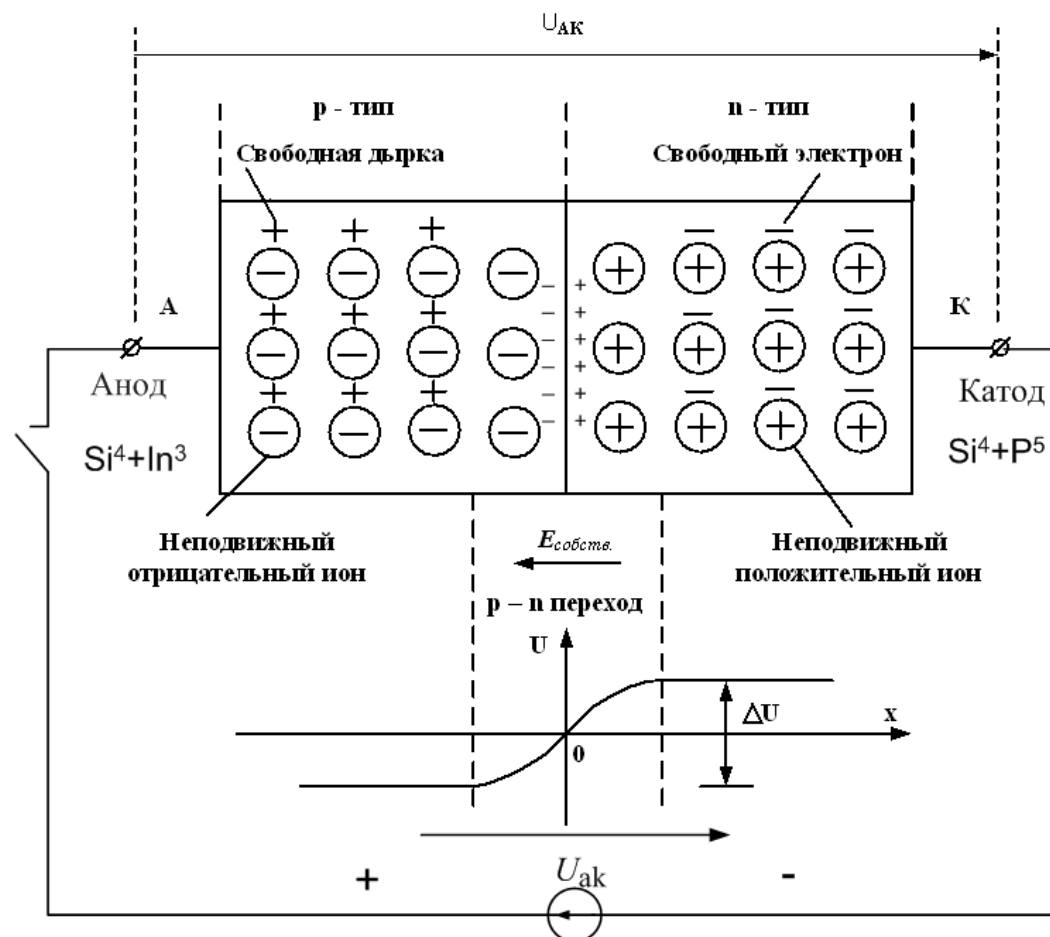


Рис.2.1

## Принцип работы *p-n* –перехода

В кристалле кремния, имеющем *n* – область и *p*- область, в результате встречного движения противоположных зарядов в области с меньшей их концентрацией на границе областей возникает диффузный ток и собственное электрическое поле  $E_{\text{собств.}}$ .

На границе раздела двух областей происходит скачкообразное изменение знака объемного заряда, возникает контактная разность потенциалов  $\psi_k$  напряженность собственного электрического поля максимальна и создает потенциальный барьер  $\Delta U$ , препятствующий дальнейшему прохождению диффузного тока.

Если внешнее напряжение  $U_{AK} < 0$ , то  $I_{\text{обр.}} = I_s \approx 10 - 20 \text{ мкА}$  - диод закрыт.

Если  $U_{AK} > 0$ , *p-n* переход откроется и во внешней цепи появится диффузионный ток  $I_{\text{диф.}}$ , вызванный диффузией основных носителей, преодолевающих потенциальный барьер.

**Величина потенциального барьера составляет для разных материалов от 0,6 В до 1,2 В.**

Полный ток при прямом смещении  $p$ - $n$  перехода определяется уравнением Эберса - Молла:

$$I_{np} = I_{diff} - I_s = I_s (e^{U/\varphi_T} - 1)$$

При температуре  $T = 300K$  тепловой потенциал  $\varphi_T = 25mV$ , поэтому уже при  $U = 0,1V$  формулу можно упростить:

$$I = I_s e^{U/\varphi_T}.$$

Дифференциальное сопротивление  $p$ - $n$  перехода можно определить по формуле:  $r_{diff} = \frac{\varphi_T}{(I + I_s)}$

### **Вольтамперная характеристика $p$ - $n$ перехода**

*Полупроводниковым диодом* называется полупроводниковый прибор, имеющий два вывода и один выпрямляющий  $p$ - $n$  переход.

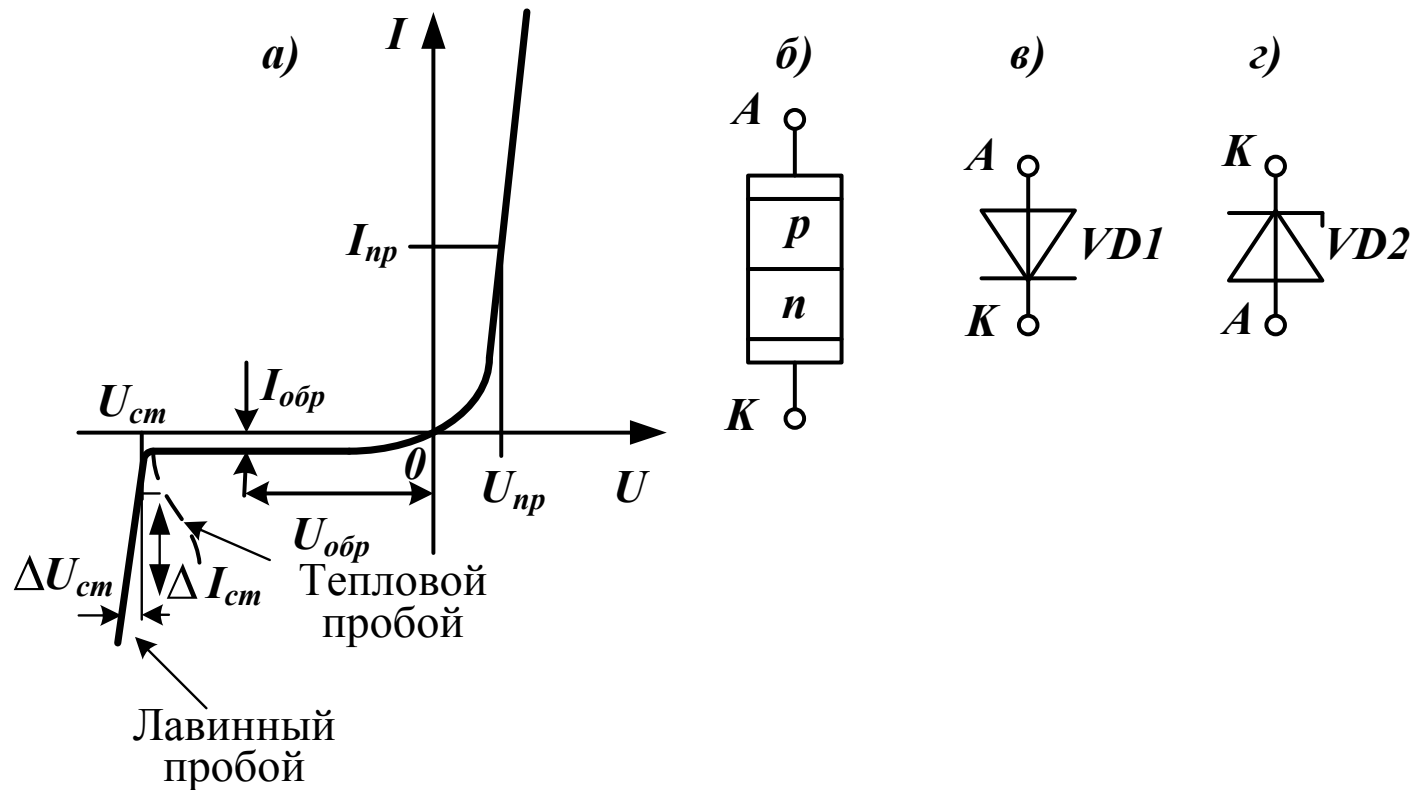


Рис. 2.2. Вольтамперная характеристика  $p$ - $n$  перехода

При протекании большого тока через  $p$ - $n$  переход в объеме полупроводника падает значительное напряжение. С учетом этого вольт-амперная характеристика приобретает вид:

$$I = I_s \cdot e^{\frac{(U-IR)}{\phi_T}}, \quad R \text{ — называют последовательным сопротивлением.}$$

*Высокочастотные диоды* детектируют сигналы на частотах до десятков мегагерц.

*Выпрямительные диоды* при высоких обратных напряжениях имеют необратимый тепловой пробой.

Диоды бывают малой (0,3 Вт), средней (до 10 Вт) и большой мощности ( $>10$  Вт).

### **Параметры диодов:**

Основные параметры выпрямительных диодов:

$I$  – номинальный прямой ток;

$U_{пр}$  — прямое напряжение;

$I_{max}$  — максимальный допустимый прямой ток;

$U_{обр.max}$  — максимальное допустимое обратное напряжение;

$I$  обратный ток, который нормируется при определенном обратном напряжении;

$R_S$ - последовательное сопротивление

## Цепи постоянного тока с диодами

### Пример 1

В цепи с диодом и резистором  $E=10\text{В}$ ,  $R=10\text{ Ом}$ . Найти ток и напряжение на диоде.

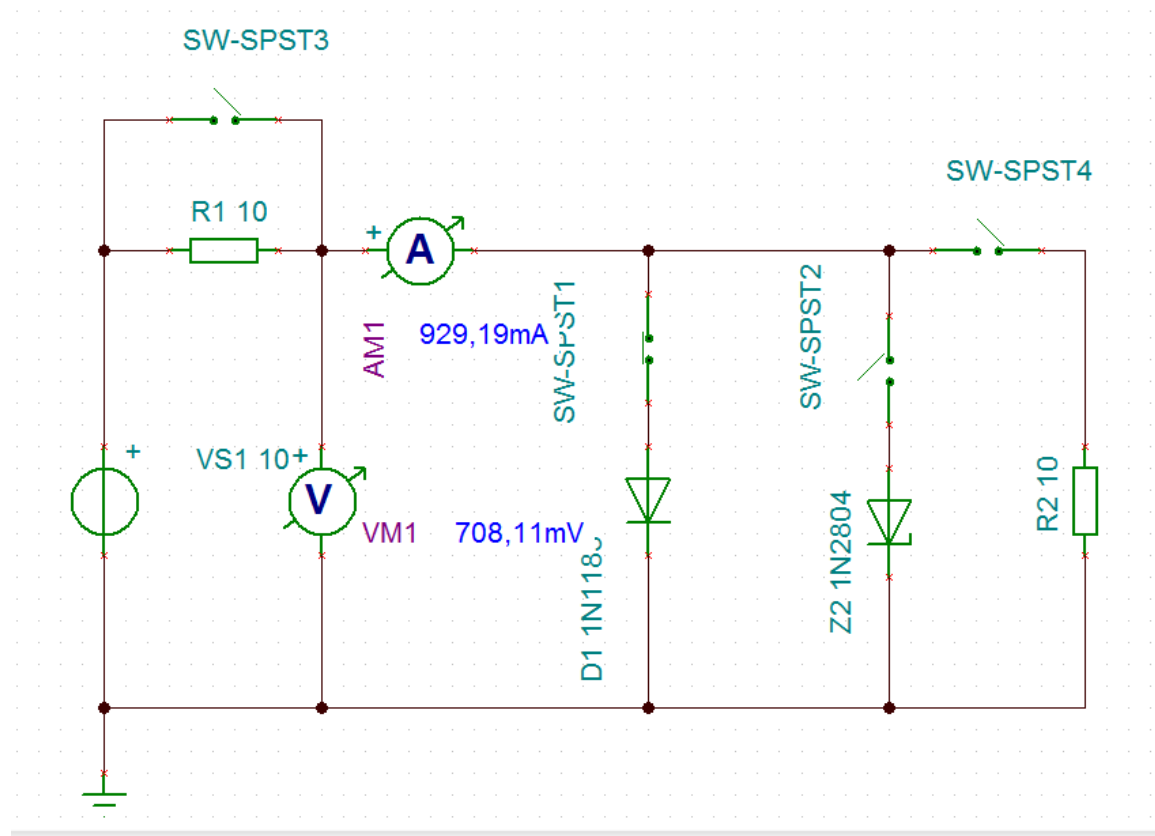


Рис.2.3

1. Найдем ВАХ диода:

2. Строим нагрузочную прямую:  $I = \frac{E}{R} - \frac{U_{нэ}}{R}$

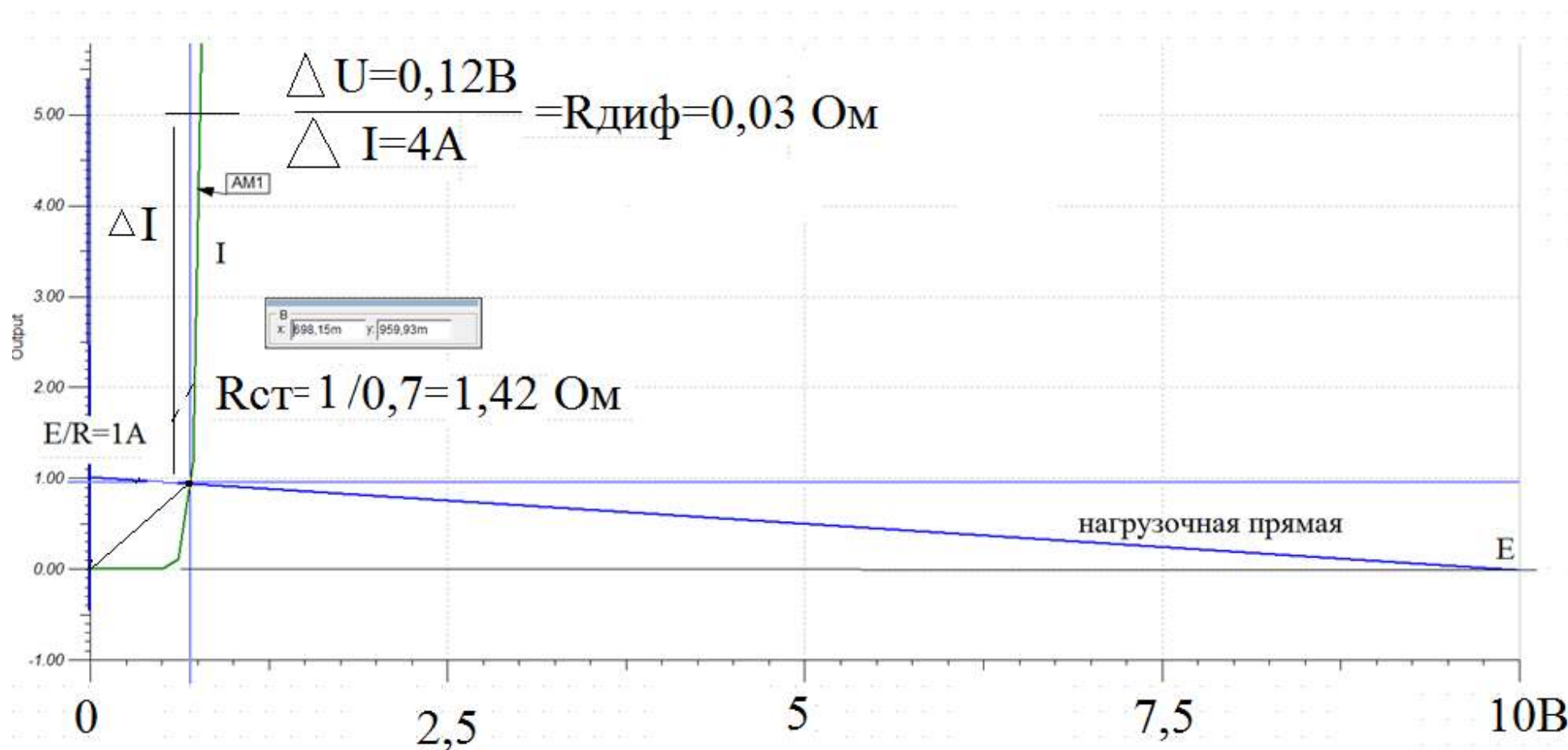
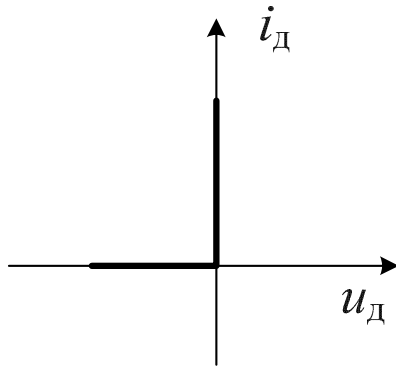


Рис.2.4



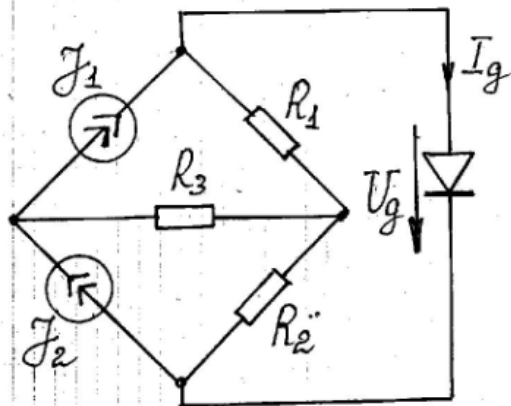


3. Находим рабочую точку:  $U_d = 698 \text{ мВ}$ ,  $I = 959 \text{ мА}$

4. Находим статическое и дифференциальное сопротивление диода.

При расчете схем с выпрямительными диодами пользуются идеализированной ВАХ:

## Пример 2



$$J_1 = 10 \text{ мА}; J_2 = 5 \text{ мА}; R_1 = R_2 = R_3 = 100 \text{ Ом.} \left| \begin{matrix} I_g \\ U_g \end{matrix} \right. ?$$

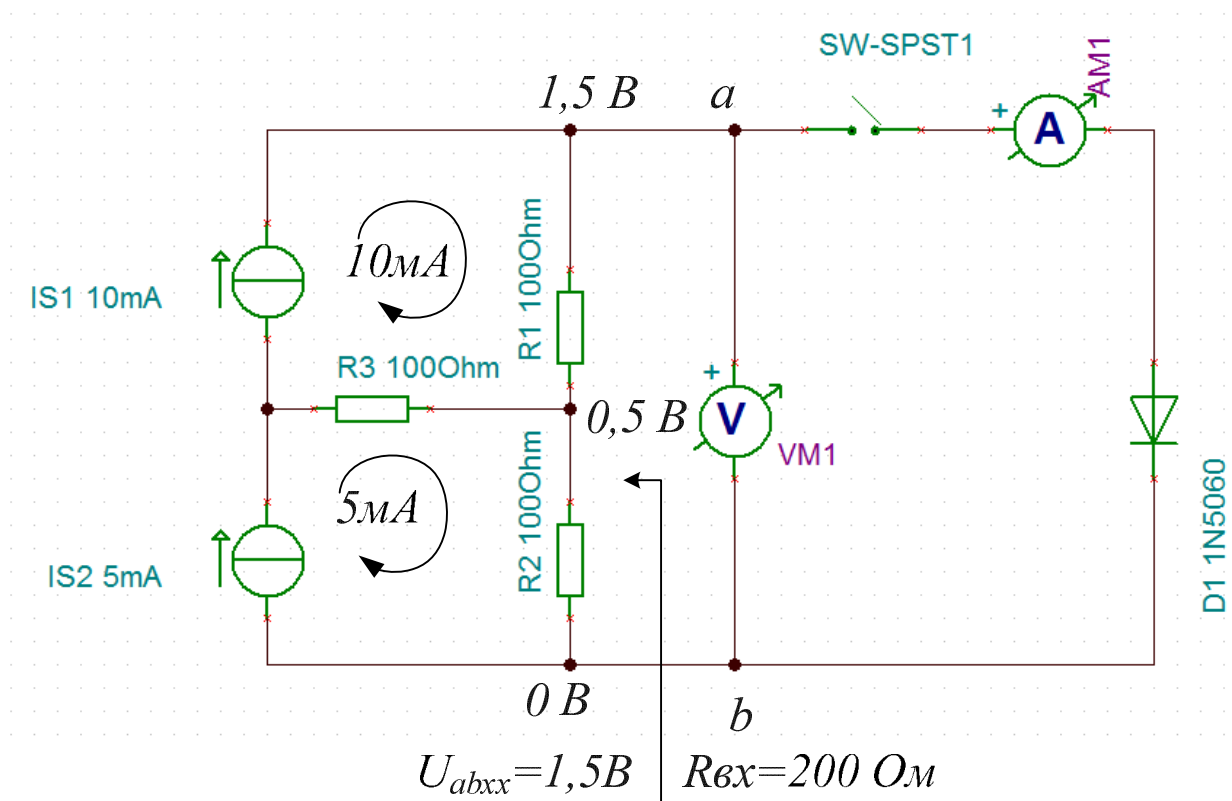


Рис.2.5.

1. Находим :

$$U_{abxx} = I_{22}R_2 + I_{11}R_1 = 1,5B, R_{vx} = R_1 + R_2 = 200 Ом$$

$$U_{abxx}=1,5B \text{ и } R_{vx}=200 Ом$$

2. Находим ВАХ диода в схеме

Получили 608 мВ, 4,58 мА

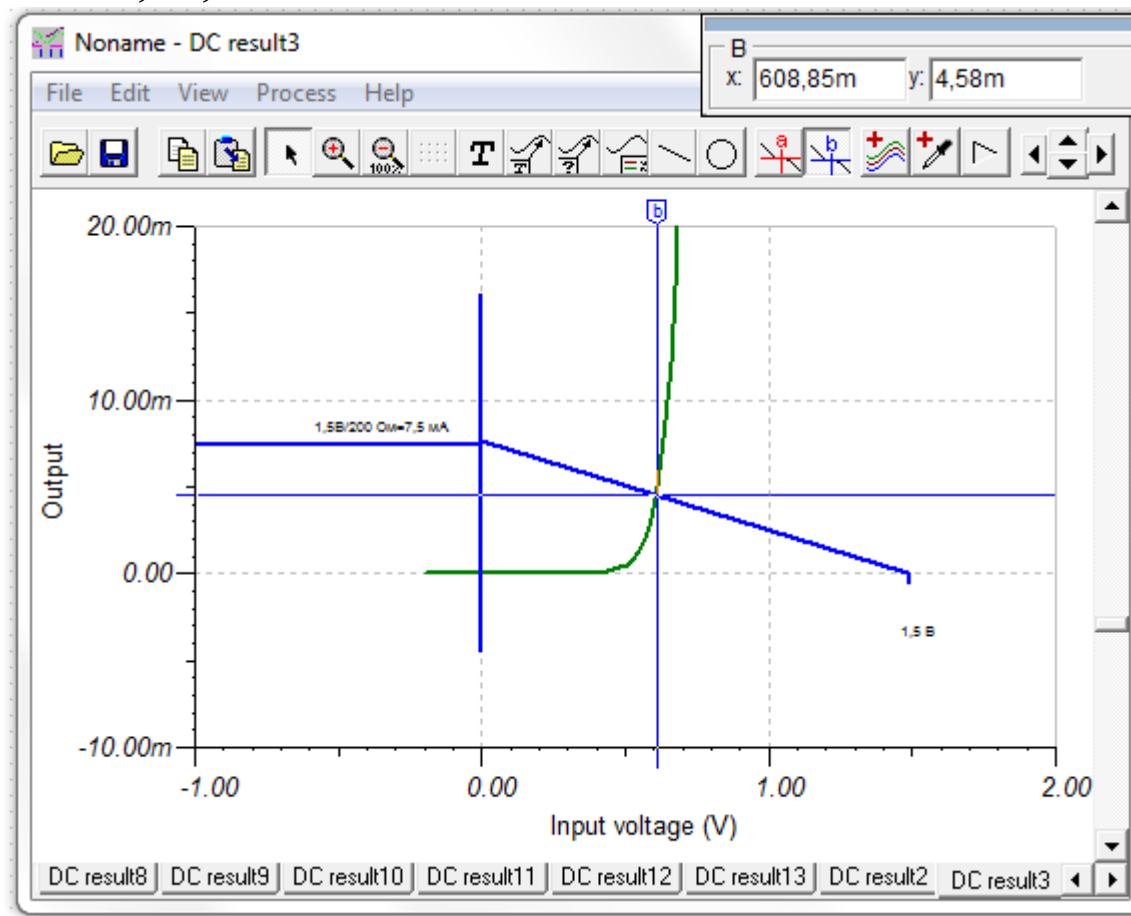


Рис.2.6

### 3. Проверим на модели

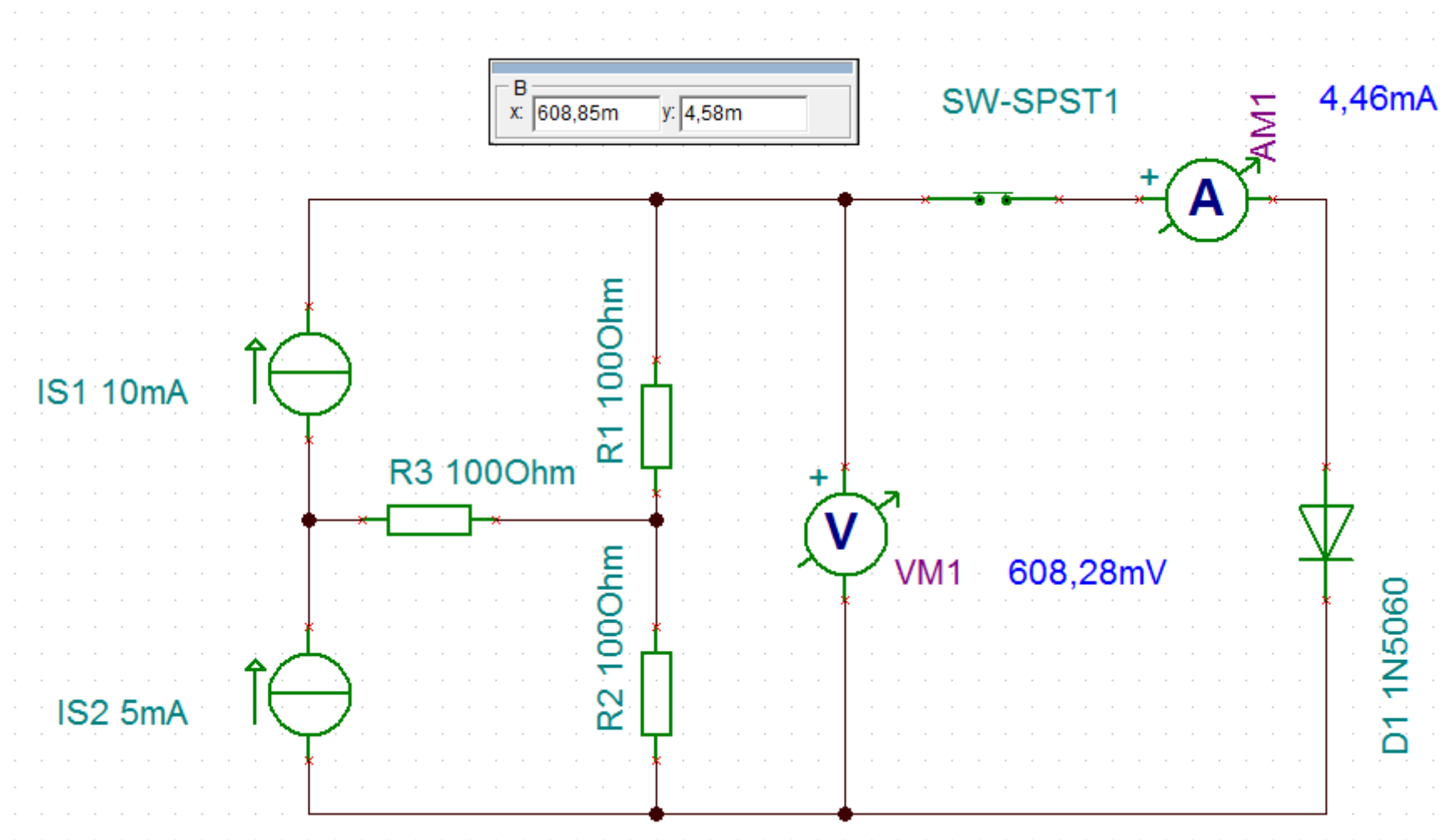


Рис.2.7.

## Стабилитроны

**Стабилитроном** называют полупроводниковый диод, работающий в режиме лавинного пробоя и предназначенный для стабилизации постоянного напряжения.

### ВАХ стабилитрона

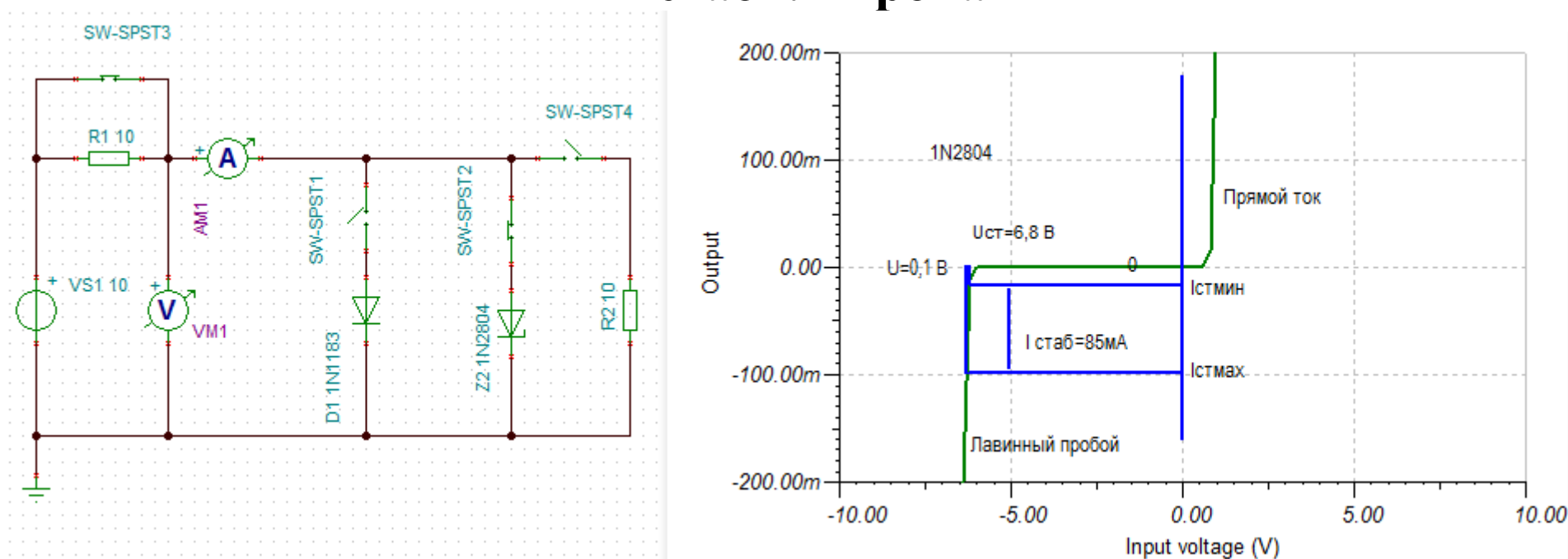


Рис.2.8

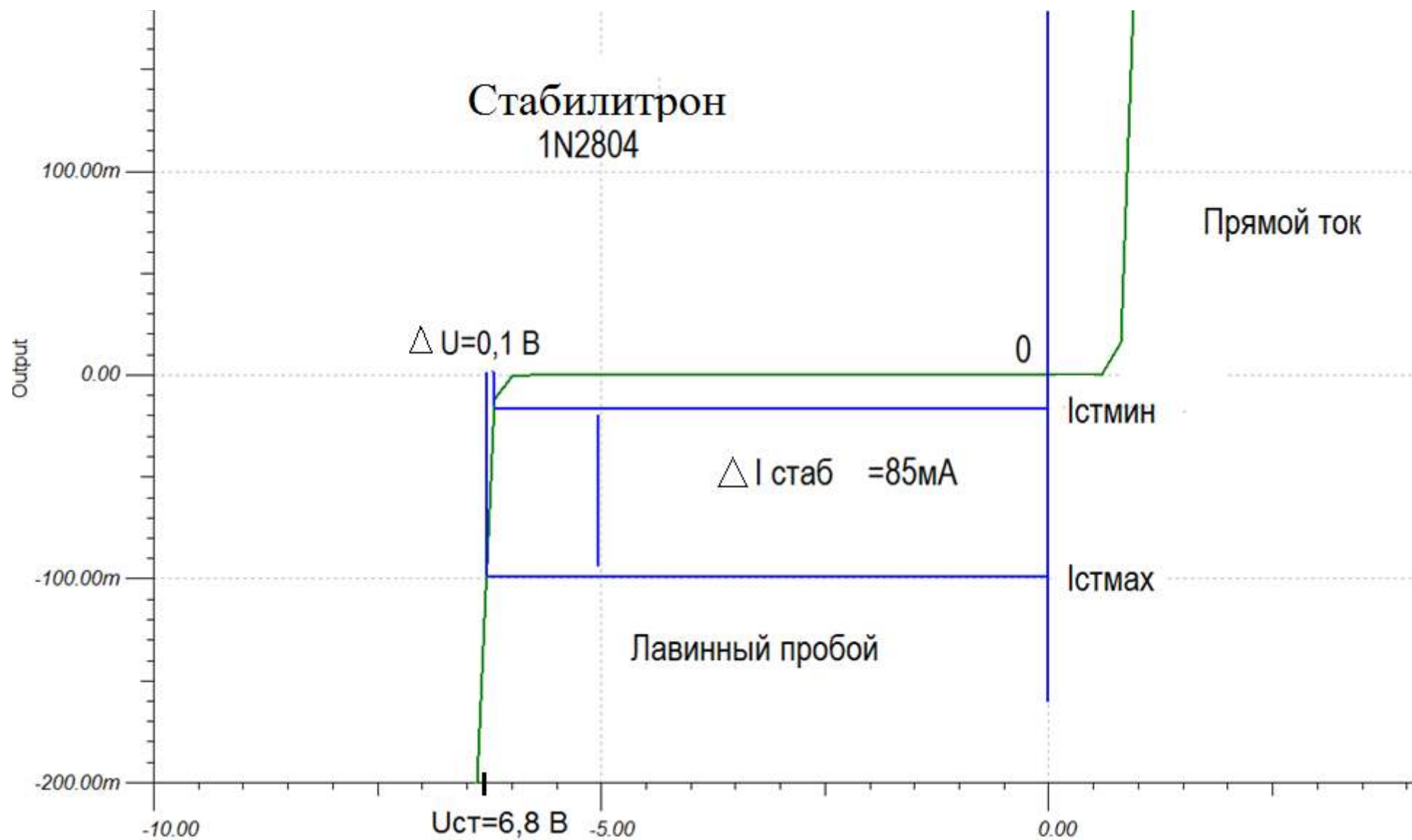


Рис.2.9

Дифференциальное сопротивление стабилитрона:

$$R_{\text{диф.ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}} = \frac{0,1\text{В}}{0,08\text{А}} = 1,25\text{Ом}.$$

Мощность рассеяния у стабилитронов составляет от сотен милливатт до десяти ватт.

### **Параметры стабилитронов:**

Основными параметрами стабилитрона являются:

$U_{\text{ст}}$  - напряжение стабилизации (3 – 180 В);

$R_{\text{диф.ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}}$  - дифференциальное сопротивление на участке стабилизации;

$I_{\text{ст min}}, I_{\text{ст max}}$  - минимальный и максимальный ток стабилизации.

## Схема стабилизатора

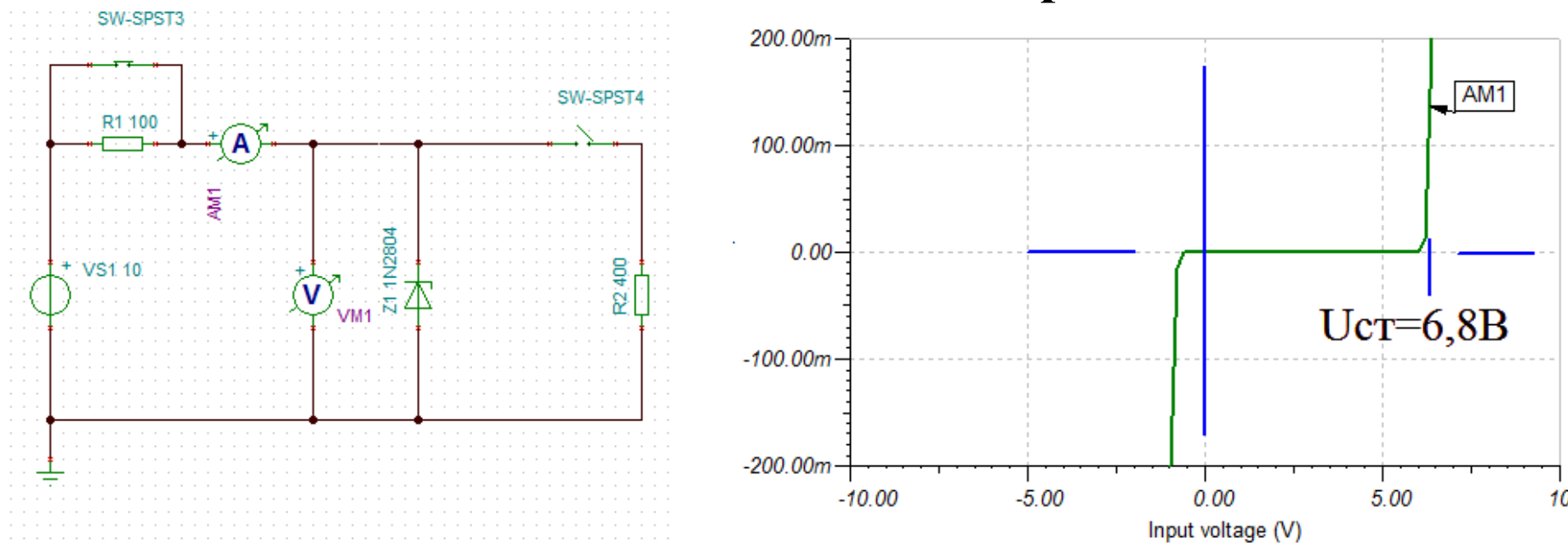


Рис.2.10

ВАХ стабилитрона

$R_1 = R_B = 100 \text{ Ом}$  - балластное сопротивление;

$R_2 = R_H = 400 \text{ Ом}$  - сопротивление нагрузки.

Качество стабилизации оценивают коэффициентом стабилизации:



$$K_{cm} = \frac{\Delta U_H / U_{HO}}{\Delta U_{BX} / U_{BXO}}.$$

### Пример 3

**1-й случай. Стабилизатор без нагрузки**

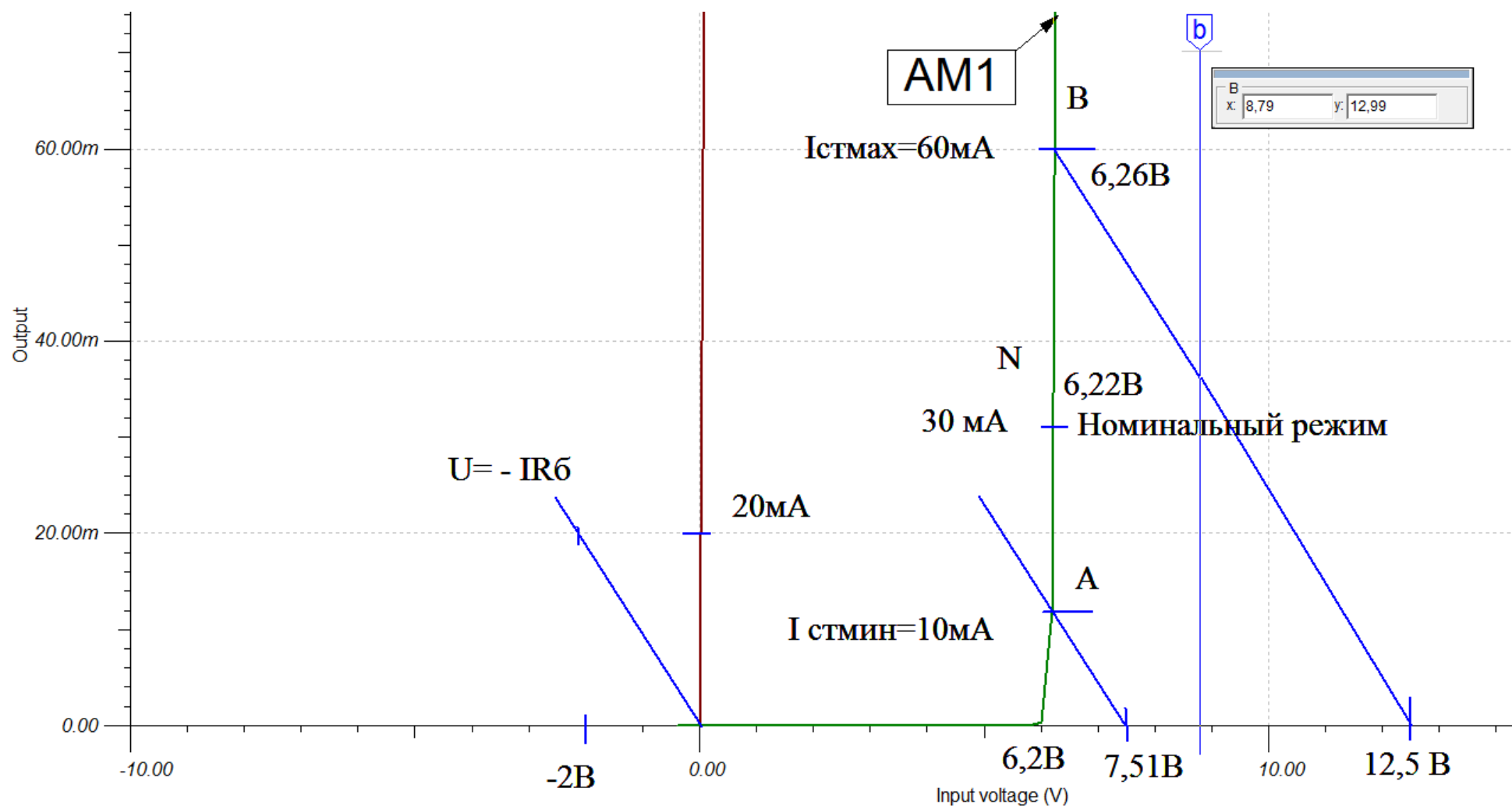


Рис.2.11

## А. Графический расчет

Порядок расчета:

1. Строим ВАХ обратной ветви стабилитрона.

По ВАХ находим: в точке А:  $I_{ct\ min} = 10\text{ мА}$ ,  $U_{ct\ min} = 6,2\text{ В}$ ;

в точке В:  $I_{ct\ max} = 60\text{ мА}$ ,  $U_{ct\ max} = 6,26\text{ В}$ .

2. Нагрузочная прямая:  $U = E - IR_B$ . Определяем наклон прямой

$$U = -IR_B. \text{ Если } U = -2\text{ В}, I = \frac{-2}{-R_B} = \frac{-2}{-100} = 20\text{ мА}.$$

3. Проводим нагрузочные прямые под этим углом в точках А и В.

Находим  $E_{min} = 7,51\text{ В}$ ,  $E_{max} = 12,5\text{ В}$ .

При этом напряжение на выходе стабилизатора изменится не более, чем на 40 мВ от номинального значения 6,22В.

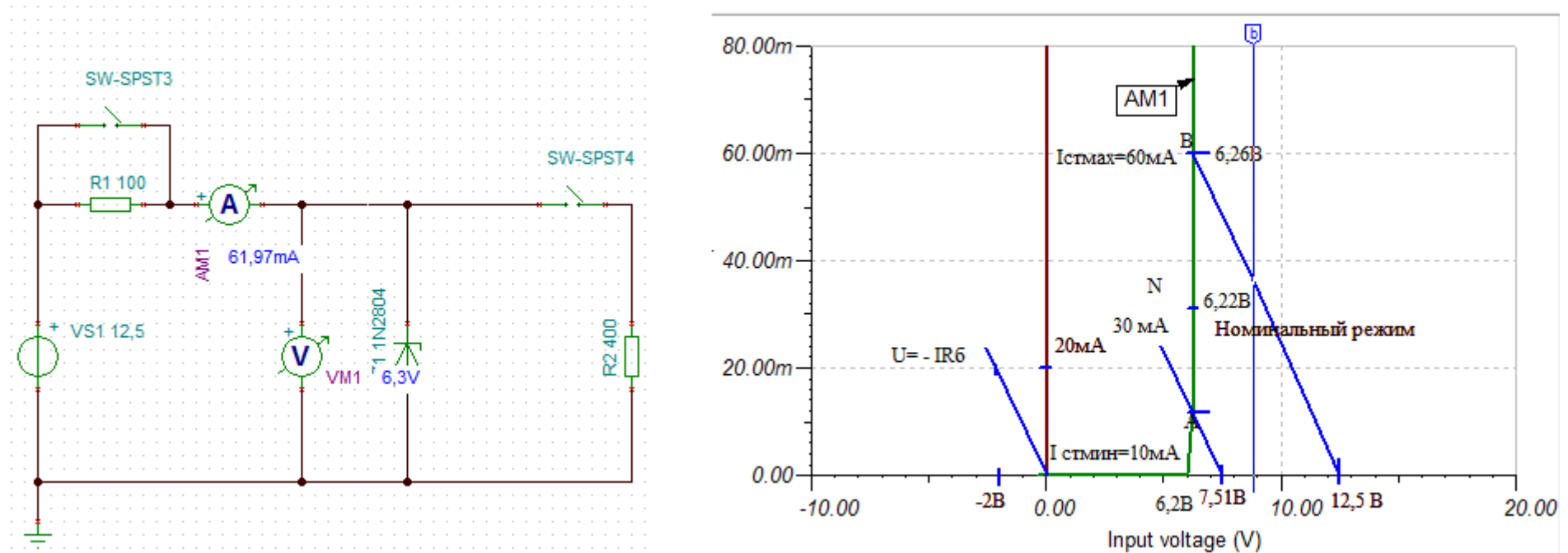


Рис.2.12

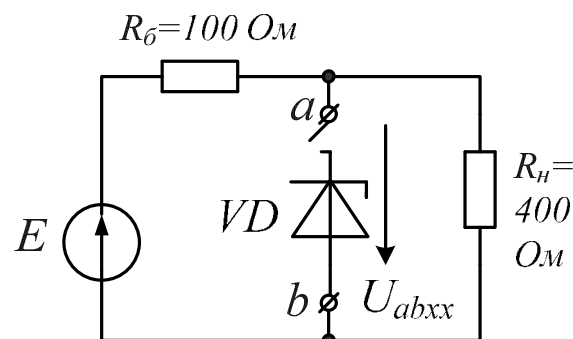
### Б. Аналитический расчет

$$E_{ст\min} = U_{ст\min} + I_{ст\min} R_B = 6,2 + 10^{-2} \cdot 100 = 7,2\text{B}$$

$$E_{ст\max} = U_{ст\max} + I_{ст\max} R_B = 6,26 + 6 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 12,26\text{B}$$

## Пример 4.

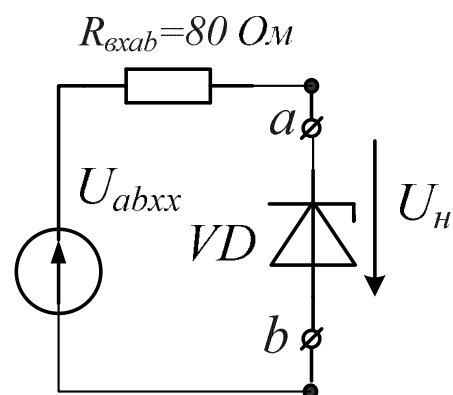
### 2-й случай. Стабилизатор с нагрузкой



1. Отключаем стабилитрон и находим:

$$U_{abxx} = \frac{ER_H}{R_B + R_H} = 0,8E,$$

$$R_{exab} = \frac{R_B R_H}{R_B + R_H} = 80 \text{ Ом}.$$



2. Строим схему с эквивалентным генератором.

3. Находим наклон нагрузочной прямой:

$$U = U_{abxx} - IR_{exab}.$$

$$\text{Если } U = -2 \text{ В}, I = \frac{-2}{-R_{exab}} = \frac{-2}{-80} = 25 \text{ мА}.$$

4. Строим ВАХ стабилитрона и проводим графический расчет:

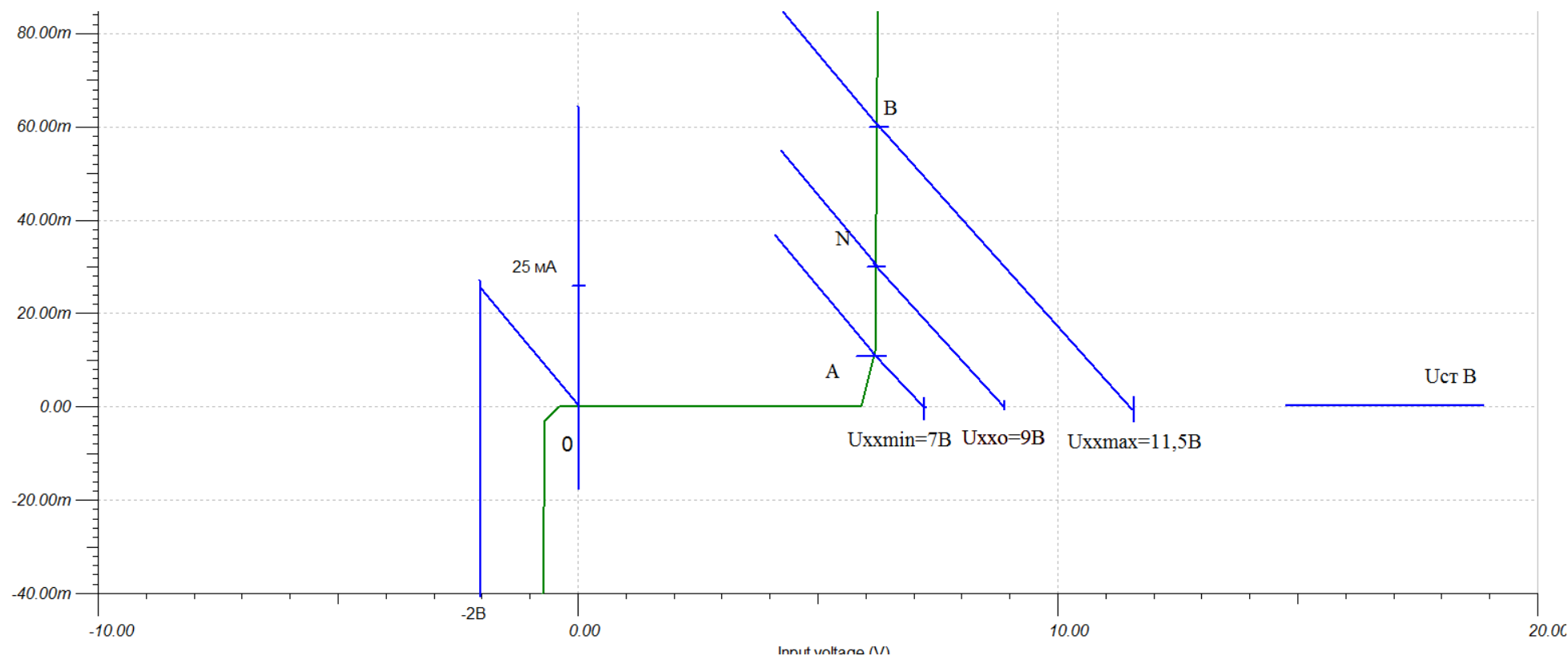


Рис.2.13

Находим:  $U_{xx \min} = 7B$ ,  $U_{xx \max} = 11,5B$ .

Вычисляем:

$$E_{\min} = \frac{U_{xx \min}}{0,8} = \frac{7}{0,8} = 8,75B, \quad E_{\max} = \frac{U_{xx \max}}{0,8} = \frac{11,5}{0,8} = 14,37B.$$

$$E_0 = \frac{U_{xx0}}{0,8} = \frac{9}{0,8} = 11,25 B.$$

### Аналитический расчет стабилизатора с нагрузкой

В точке А:

$$U_{н min} = U_{ст min} = 6,2 B, I_{н min} = \frac{U_{н min}}{R_H} = \frac{6,2}{400} = 15,5 mA,$$

$$E_{min} = U_{н min} + (I_{н min} + I_{ст min})R_B = 6,2 + (15,5 + 10) \cdot 10^{-3} 100 = 8,75 B$$

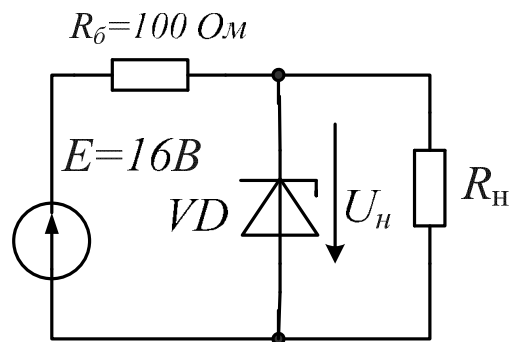
В точке В:

$$E_{max} = U_{н max} + (I_{н max} + I_{ст max})R_B = 6,26 + (15,6 + 60) \cdot 10^{-3} 100 = 13,82 B.$$

### Коэффициент стабилизации:

$$K_{ст} = \frac{\frac{\Delta U_H}{U_{HO}}}{\frac{\Delta U_{BX}}{U_{BXO}}} = \frac{\frac{0,06}{6,22}}{\frac{(11,5 - 7)}{9}} = \frac{0,0096}{0,388} = 0.025$$

## Пример 5



**Изменение сопротивления нагрузки**  
В каких пределах может меняться сопротивление нагрузки, чтобы напряжение находилось на участке стабилизации ?

### Решение

1. В точке А:

Ток через балластное сопротивление:

$$I_{вхА} = \frac{E - U_{ст min}}{R_B} = \frac{16 - 6,2}{100} = 98 \text{ мА}.$$

Ток в нагрузке:  $I_{нА} = I_{вхА} - I_{ст min} = 88 \text{ мА}.$

$$R_{нА} = \frac{U_{ст min}}{I_{нА}} = 70,45 \text{ Ом}.$$



$$2. \text{ В точке В: } I_{\text{вхВ}} = \frac{E - U_{\text{сг max}}}{R_{\text{Б}}} = \frac{16 - 6,26}{100} = 97,4 \text{ мА},$$

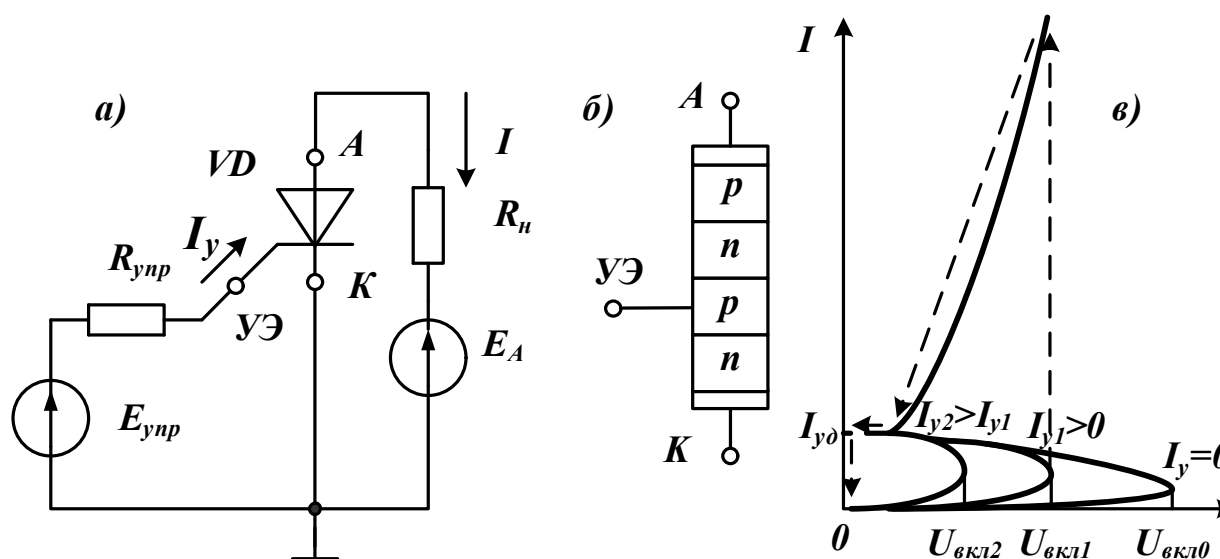
$$I_{\text{нВ}} = I_{\text{вхВ}} - I_{\text{сг max}} = 37,4 \text{ мА},$$

$$R_{\text{нВ}} = \frac{U_{\text{сг max}}}{I_{\text{нВ}}} = \frac{6,26}{0,0374} = 167,37 \text{ Ом}.$$

Ответ: сопротивление нагрузки может меняться от 70 до 167 Ом.

## Тиристоры

**Тиристором** называют полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями и тремя или более последовательно включенными  $p$ - $n$  переходами. Кроме анодного и катодного выводов управляемый тиристор имеет еще вывод управляющего электрода УЭ. УЭ может подключаться к ближайшей к катоду  $p$ - области (тиристор с катодным управлением) или к ближайшей к аноду  $n$ - области (тиристор с анодным управлением).



Основные параметры тиристоров:

Напряжение на открытом тиристоре  $U_{отк} = 1 - 1,5 В$ ;

Максимальный допустимый ток анода  $I_{a\max}$ ;

Управляющее напряжение и ток  $U_y, I_y$ ;

Время включения и выключения  $t_{\text{вкл}}, t_{\text{выкл}}$ ;

Допустимое обратное напряжение:  $U_{\text{обр}\max}$ .

ВАХ тиристора

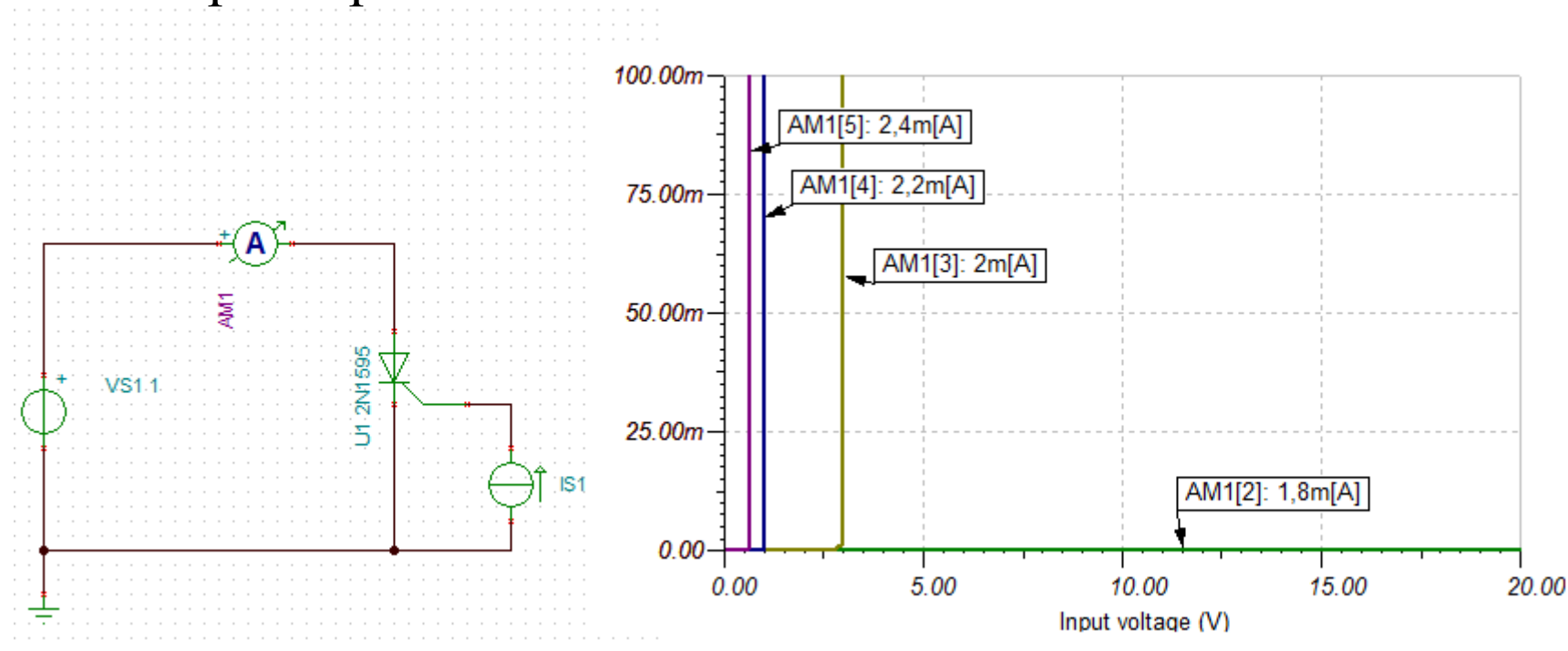


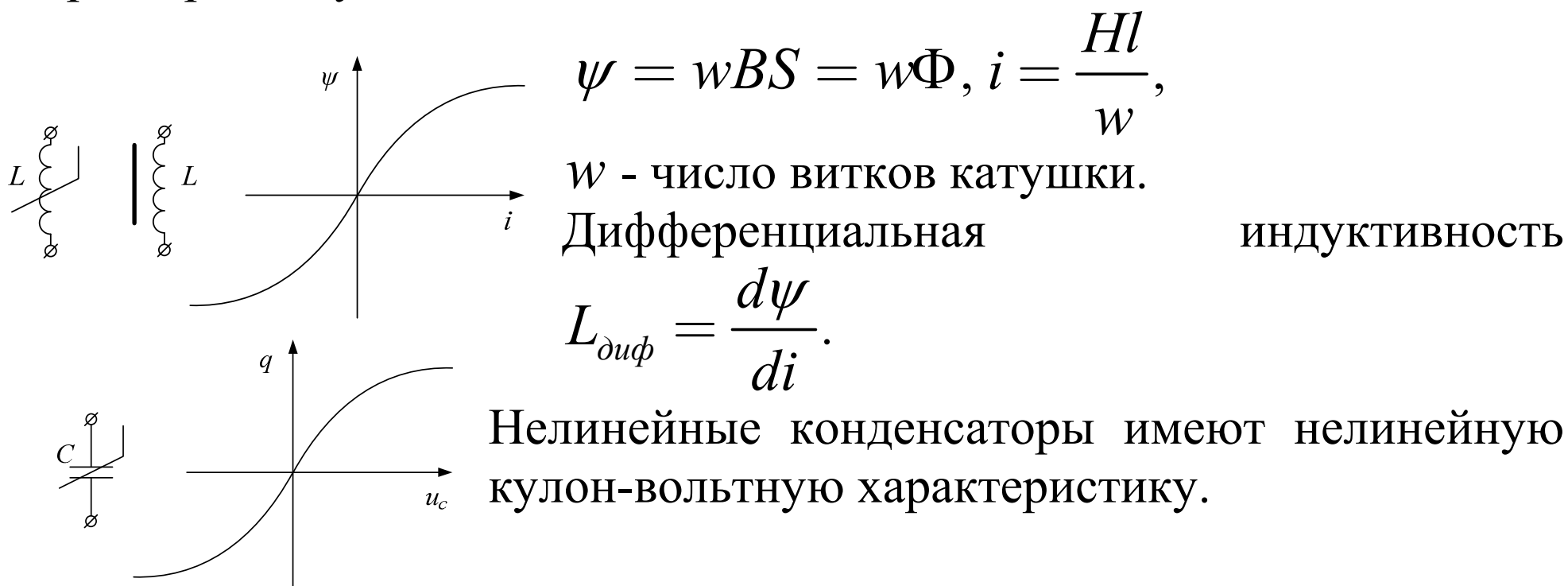
Рис.2.14

## Нелинейные цепи переменного тока

В цепях переменного тока применяют резистивные, индуктивные и емкостные элементы.

Нелинейные резистивные элементы: нелинейные резисторы, диоды, стабилитроны, транзисторы.

Нелинейные индуктивности имеют нелинейную вебер-амперную характеристику.



Дифференциальная емкость  $C_{диф} = \frac{dq}{du_C}$ .

### **Свойства нелинейных цепей на переменном токе**

1. Происходит преобразование (искажение) спектра сигнала.
  2. Режим зависит от предшествующего состояния.
  3. Возможно умножение частоты и появление кратных гармоник ( $\omega, 3\omega, 5\omega \dots$ ).
  4. Возможно деление частоты ( $\omega, \frac{\omega}{3}, \frac{\omega}{5} \dots$ ).
  5. Возможна генерация колебаний (автоколебания, автогенераторы).
  6. Модуляция колебаний (управление амплитудой, фазой и частотой).
- Пример искажения формы тока в нелинейной цепи.

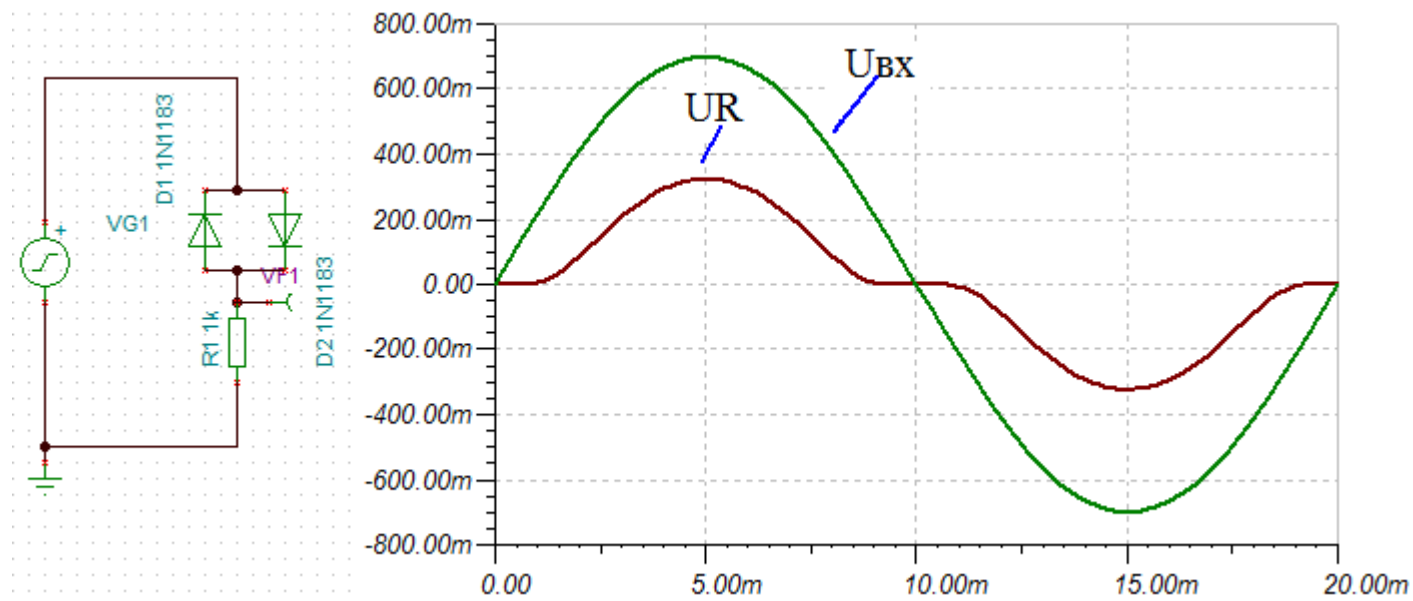
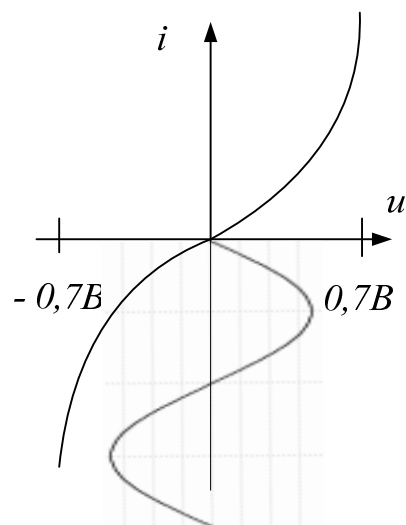
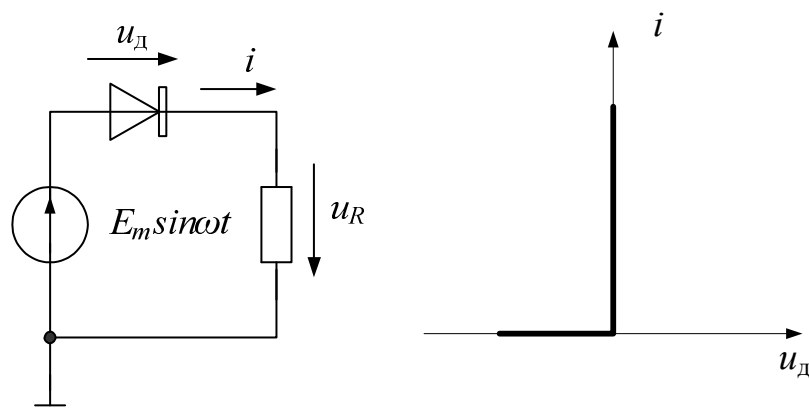


Рис.2.15

# Выпрямление переменного напряжения с помощью диодов

## Однополупериодный выпрямитель



ВАХ идеального диода  
 $iR + u_d = E_m \sin \omega t$ .

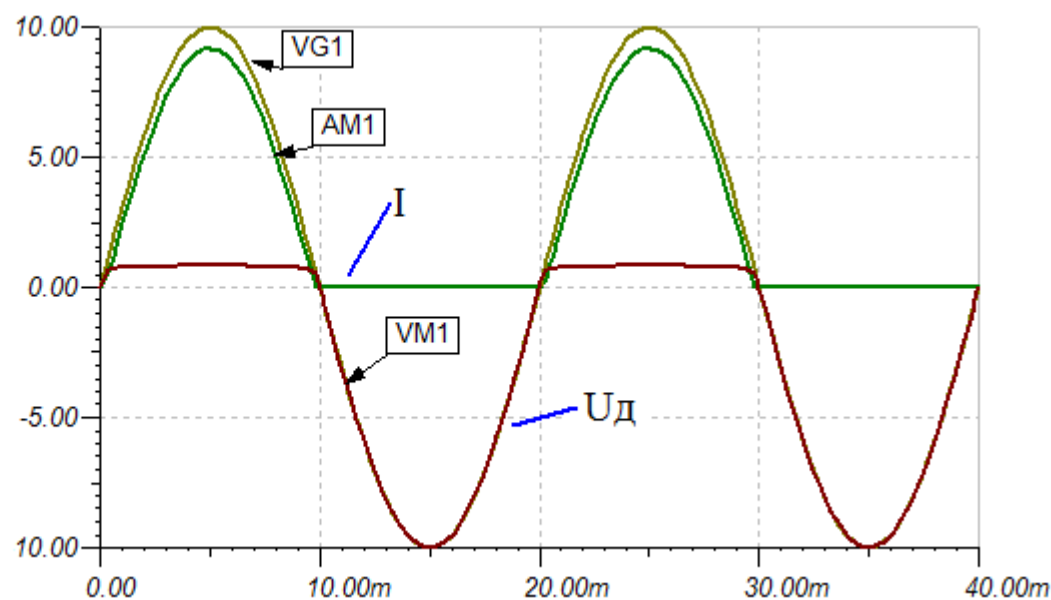
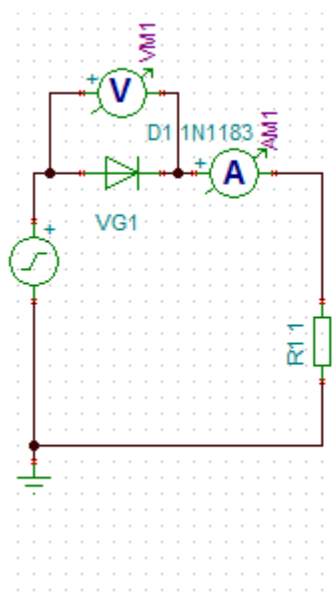


Рис.2.16

Ток имеет пульсирующий характер. Постоянные составляющие:

$$I_0 = \frac{I_m}{\pi}, \quad U_0 = \frac{U_m}{\pi}.$$

### Двухполупериодное выпрямление

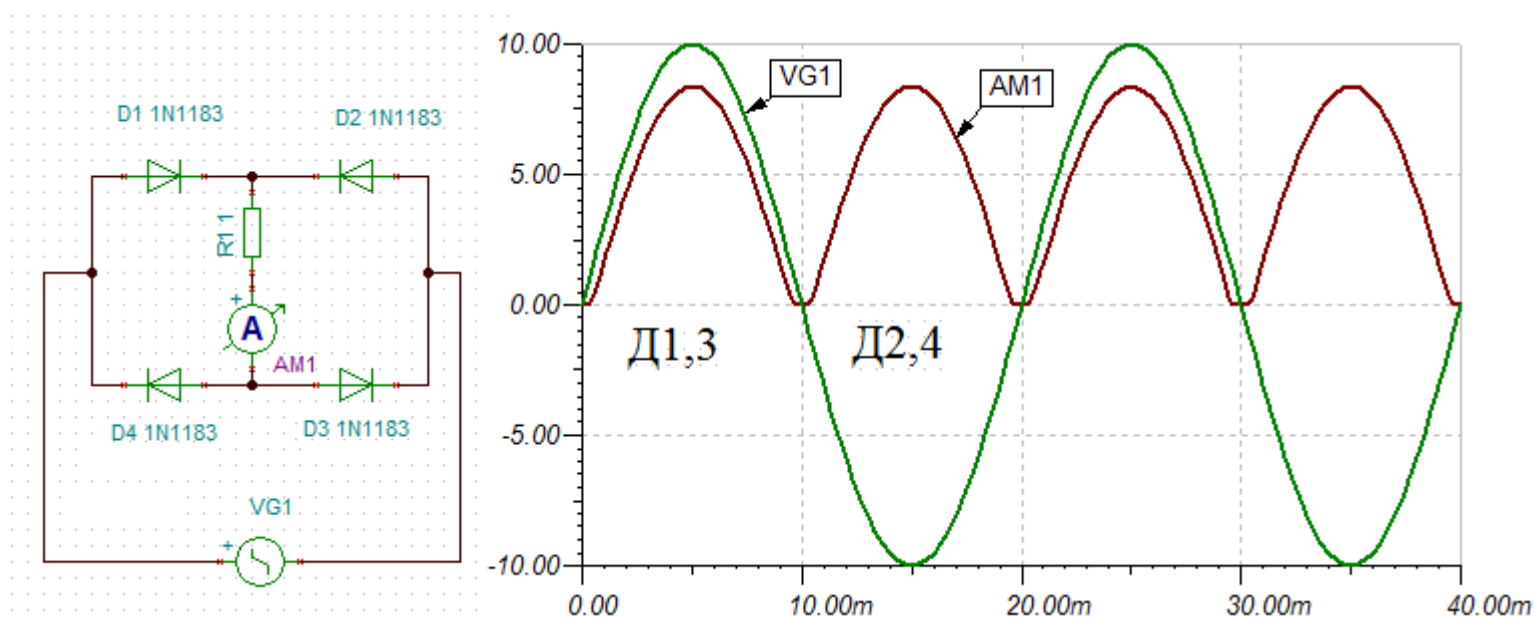


Рис.2.17

Постоянные составляющие  $I_0 = \frac{2I_m}{\pi}$ ,  $U_0 = \frac{2U_m}{\pi}$ .



## Сглаживание пульсаций выпрямленного тока

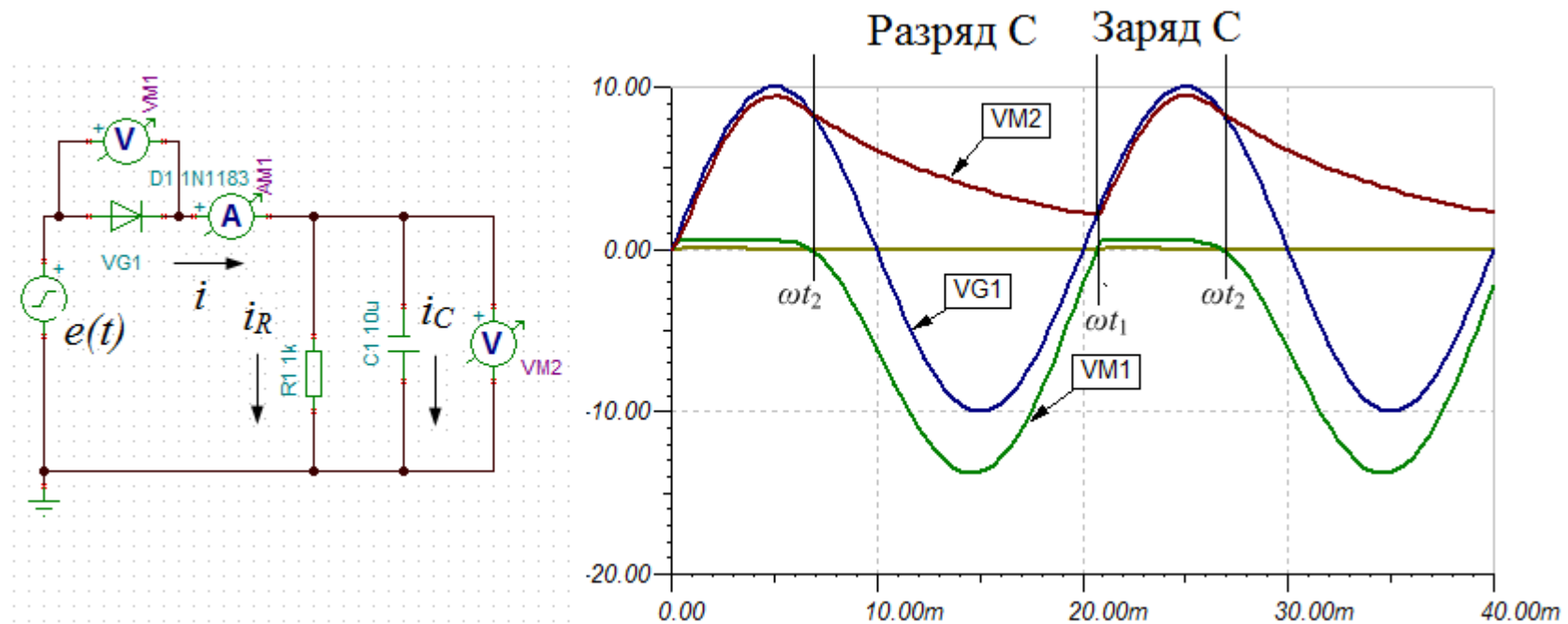


Рис.2.18

Уравнения выпрямителя:

$$i = i_C + i_R, \quad u_d + u_C = E_m \sin \omega t, \quad i_R = \frac{u_C}{R}, \quad i_C = C \frac{du_C}{dt},$$

$$u_d = E_m \sin \omega t - u_C.$$

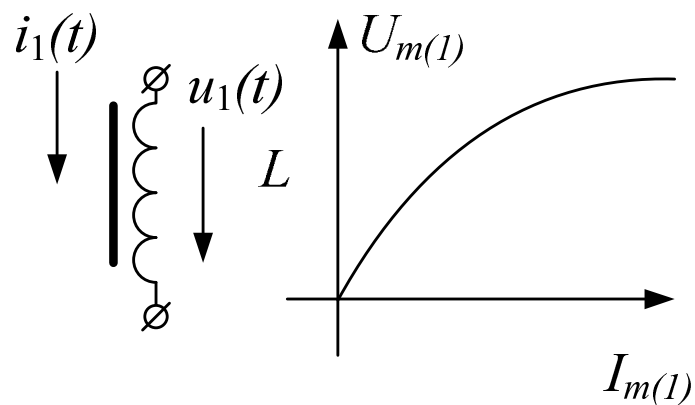
В момент  $\omega t_2$  становится  $e(t) < u_C$ , диод закрывается и происходит разряд емкости.

В момент  $\omega t_1$  становится  $e(t) > u_C$ . Диод открывается и происходит заряд емкости.

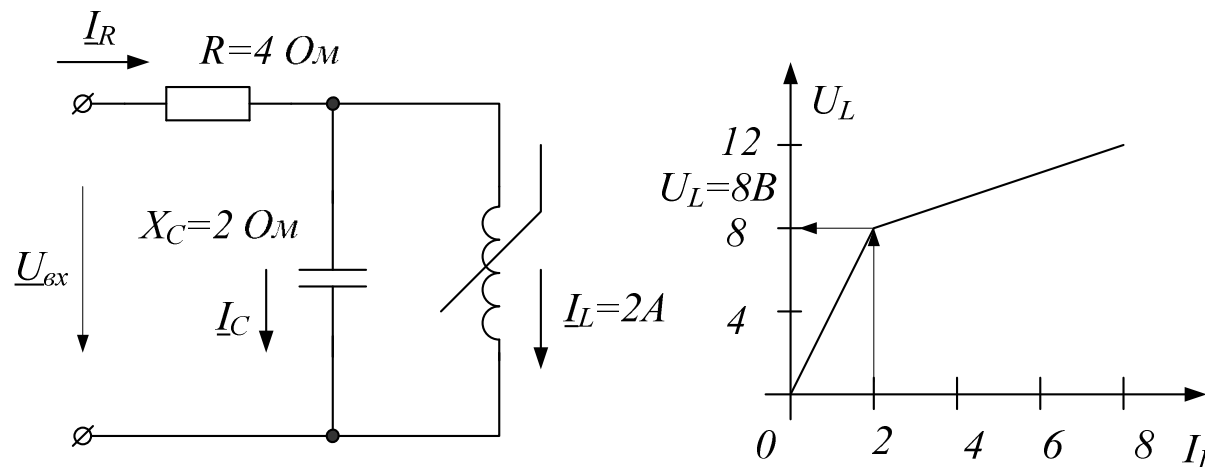
Если увеличивать  $C$ , постоянная составляющая  $U_0 \rightarrow E_m$ .

### Расчет нелинейной цепи по первой гармонике напряжения и тока

Находят нелинейную зависимость напряжения первой гармоники от тока первой гармоники несинусоидального сигнала. Используют эту ВАХ при расчете.



## Пример 6



Задан ток в индуктивности.

Найти напряжение на входе и построить векторную диаграмму.

Решение.

1. Считаем, что  $\underline{I}_L = 2e^{j0^0}\text{ A}$ .
2. По ВАХ для тока  $\underline{I}_L = 2\text{ A}$  находим действующее значение напряжения  $\underline{U}_L = 8\text{ V}$ .

$$3. \text{ Находим: } \underline{U}_C = \underline{U}_L = +j8\text{ V}, \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{-j2} = -4\text{ A},$$

$$\underline{I}_R = \underline{I}_L + \underline{I}_C = 2 - 4 = -2\text{ A}, \underline{U}_R = R \cdot \underline{I}_R = -8\text{ V}.$$

$$\underline{U}_{\Sigma} = \underline{U}_R + \underline{U}_L = -8 + j8 = 8\sqrt{2}e^{j135^\circ} \text{ B.}$$

#### 4. Векторная диаграмма

