

## Аппроксимация статических характеристик диода при прямом смещении.

Кубов В.И., 2012

Классическая вольтамперная характеристика диода  $I(V) = I_S \cdot \left( \exp\left(\frac{V}{V_T \cdot N}\right) - 1 \right)$ .

Здесь  $V_T = \frac{k \cdot T}{q_e}$ , где  $k$  – постоянная Больцмана,  $q_e$  – заряд электрона,  $T$  – температура;

для комнатной температуры  $T = 293^\circ\text{K}$  -  $V_T = 25\text{mV}$  ;

$N$  - коэффициент вырождения, для идеального диода  $N = 1$ ;

$I_S$  – ток насыщения, для модели идеального диода  $I_S = 1\text{e-}14$  {A}.

Для определения вида вольтамперной характеристики надо задать два параметра:  $I_S$  – ток насыщения и  $N$  - коэффициент вырождения.

Для напряжений смещения  $V \gg V_T$  уравнение вольтамперной характеристики диода можно представить в приближенном виде:

$$I(V) \approx I_S \cdot \exp\left(\frac{V}{V_T \cdot N}\right) \text{ или } I(V) \approx \exp\left(\frac{V}{V_T \cdot N} + \ln(I_S)\right).$$

Параметр  $N$  определяет крутизну, а  $I_S$  – смещение вольтамперной характеристики в логарифмическом масштабе. Т.е. эти параметры влияют на форму вольтамперной характеристики. Но прямое использование этих параметров для подбора необходимых значений, описывающих конкретную вольтамперную характеристику, сопряжено с известными неудобствами. Было бы удобнее использовать точки на вольтамперной характеристике.

Определив на вольтамперной характеристике диода пару точек  $I_0, V_0$  и  $I_e, V_e$  можно определить соответствующие значения  $N$  и  $I_S$  (рис.1).

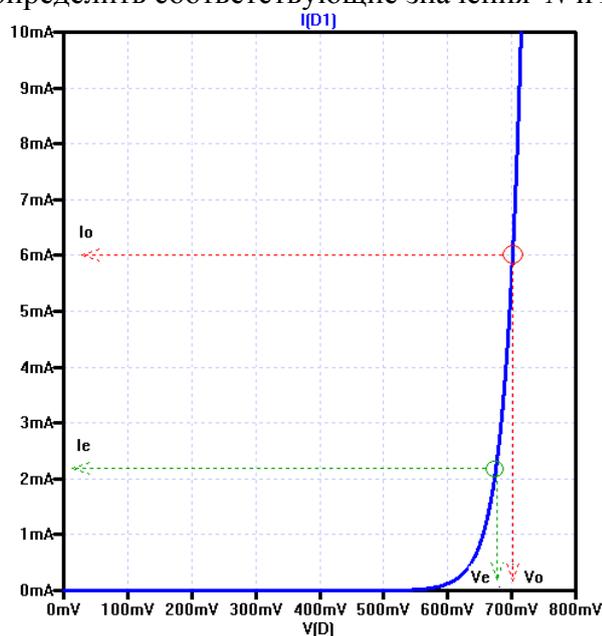


Рис.1. Вольтамперная характеристика идеального диода

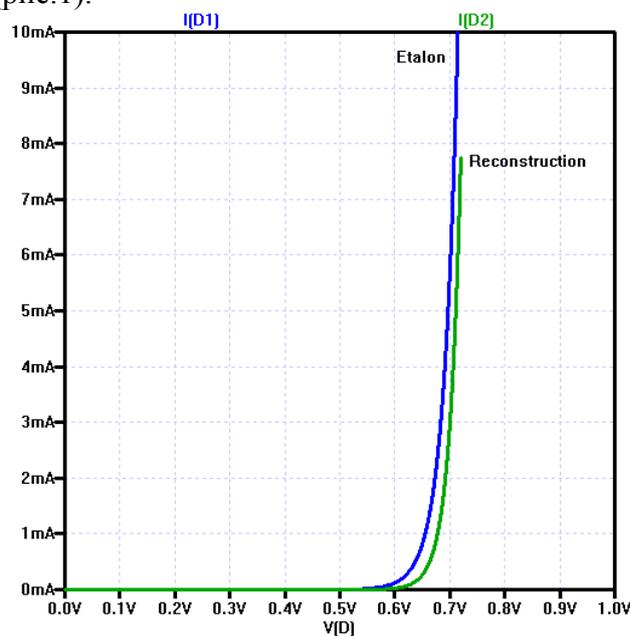


Рис.2. Вольтамперные характеристики диода с подобранными параметрами.

Вычисления существенно упрощаются, если точки  $I_0, V_0$  и  $I_e, V_e$  выбрать специальным образом. А именно, выбрать точку  $I_e, V_e$  таким образом, чтобы  $\frac{I_0}{I_e} = e \approx 2.7$ .

Тогда для двух точек имеем два уравнения:

$$I_0 = \exp\left(\frac{V_0}{V_T \cdot N} + \ln(I_S)\right) \text{ и } I_e = \exp\left(\frac{V_e}{V_T \cdot N} + \ln(I_S)\right), \text{ с условием } \frac{I_0}{I_e} = e.$$

Или в логарифмическом виде:

$$\ln(I_0) = \frac{V_0}{V_T \cdot N} + \ln(I_S) \text{ и } \ln(I_e) = \frac{V_e}{V_T \cdot N} + \ln(I_S), \text{ и } \ln(I_0) = \ln(I_e) + 1.$$

Вычитая из одного уравнение другое, получим:  $\ln(I_0) - \ln(I_e) = \frac{V_0}{V_T \cdot N} - \frac{V_e}{V_T \cdot N} = 1.$

Разрешая это уравнение относительно  $N$ , окончательно получим:

$$N = \frac{V_0 - V_e}{V_T} = \frac{\Delta V}{V_T},$$

здесь  $\Delta V = V_0 - V_e$  – ширина участка возрастания напряжения по изменению тока в 2.7 раз.  
 $V_T = 25\text{mV}$  для комнатной температуры  $T = 293^\circ\text{K}$ .

Определив значение  $N$ , можно затем определить значение  $I_S$ :

$$I_S = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{V_0}{V_T \cdot N}\right) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{V_0 \cdot V_T}{V_T \cdot \Delta V}\right) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{V_0}{\Delta V}\right),$$

или в более симметричном виде:

$$\frac{I_0}{I_S} = \exp\left(\frac{V_0}{\Delta V}\right) = 10^{\left(\frac{V_0}{\Delta V} \cdot 0.43\right)}.$$

Таким образом, чтобы определить параметры для модели диода надо:

1. Выбрать на вольтамперной характеристике диода точку  $I_0, V_0$ , желательно с максимальным значением тока.
2. Найти на вольтамперной характеристике диода точку  $I_e, V_e$  такую, что бы ток  $I_e$  был в 2.7 раз меньше тока  $I_0$ .
3. Определить соответствующую ширину интервала изменений напряжений  $\Delta V = V_0 - V_e$ .
4. Рассчитать  $N = \frac{\Delta V}{V_T}$ ,  $V_T = 25\text{mV}$  для комнатной температуры  $T = 293^\circ\text{K}$ .  $V_T = \frac{k \cdot T}{q_e}$ .
5. Рассчитать отношение  $p_e = \frac{V_0}{\Delta V}$ , или вычислить десятичную степень  $p_{10} = \frac{V_0}{\Delta V} \cdot 0.43$ .
6. Вычислить ток  $I_S = I_0 \cdot e^{-p_e}$  или  $I_S = I_0 \cdot 10^{-p_{10}}$ .

**Пример** (по рис.1):

1.  $I_0=6\text{mA}$ ;  $V_0=0.70\text{V}$ .
2.  $I_e=6/2.7=2.2\text{mA}$ ;  $V_e=0.68\text{V}$ .
3.  $\Delta V=0.70-0.68=0.02\text{V}$ .
4.  $N=0.02\text{V}/25\text{mV}=0.8$ . Получили  $N=0.8$  вместо  $N=1$ . Слишком грубо подошли к оценке  $\Delta V$ .
5.  $p_e=V_0/\Delta V=0.70/0.02=35$ ;  $p_{10}=35 \cdot 0.43=15$
6.  $I_s=6\text{mA}/10^{15}=6 \cdot 10^{-18}\text{A}$ . Получили  $6\text{e-}18\text{A}$  вместо  $1\text{e-}14\text{A}$ .

Подставим эти значения в модель диода в схеме (рис.3) и выполним расчеты.

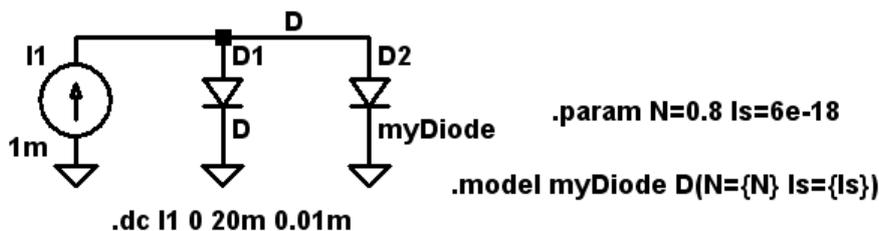


Рис.3. Схема для сравнения вольтамперных характеристик диодов.

В схеме два диода:

- D1 – эталонный идеальный диод -  $N=1$ ;  $I_s=1\text{e-}14$ .
- D2 – диод с расчетными параметрами  $N=0.8$ ;  $I_s=6\text{e-}18$ . Результат реконструкции.

На рис.3 приведены результаты сопоставления вольтамперных характеристик двух диодов: эталонного и результата реконструкции. Результаты сравнения не так уж и плохи, как можно было бы ожидать. Есть небольшой сдвиг, но его легко можно учесть, внося небольшую поправку в значение  $V_0$ .

А вот более полезная возможность. Можно подбирать вольтамперную характеристику диода изменяя ширину (крутизну) переходного участка. На рис.4 приведена соответствующая схема.

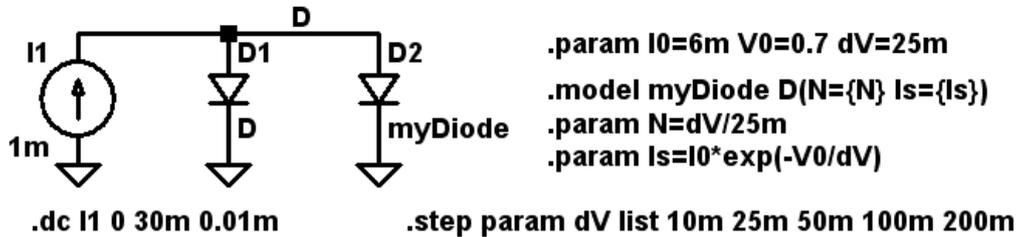


Рис.4. Схема для подбора параметров диодов.

Здесь все необходимые вычисления выполняются автоматически по заданным значениям:  $I_0$  – ток,  $V_0$  – напряжение;  $dV$  – ширина переходного участка.

На рис.5 приведено семейство расчетных характеристик для разных значений крутизны вольтамперной характеристики (параметр  $dV$ ).

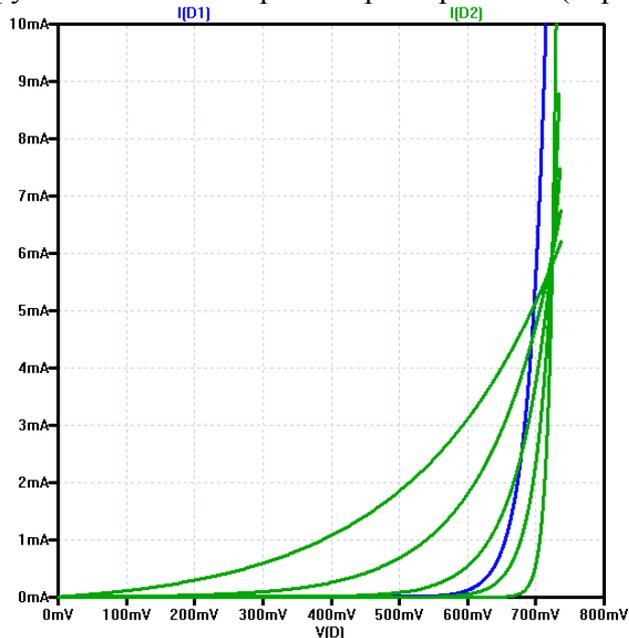


Рис.5. Семейство вольтамперных характеристик для разных значений крутизны до коррекции.

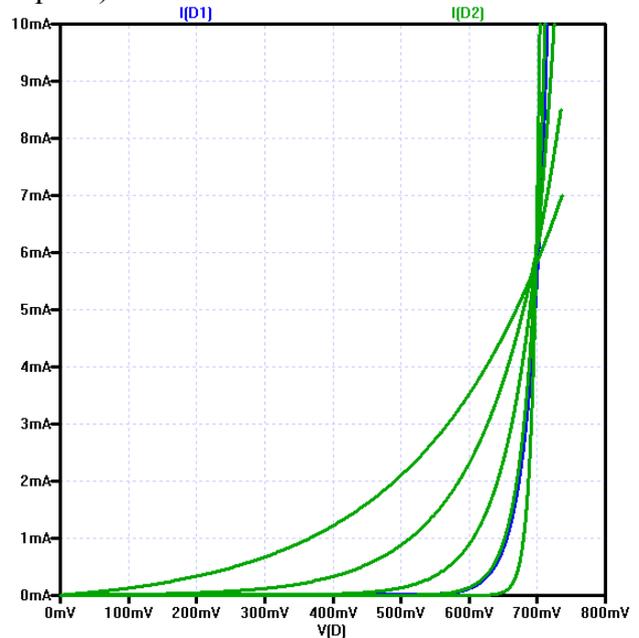


Рис.6. Семейство вольтамперных характеристик для разных значений крутизны после коррекции.

Результаты реконструкции на рис.5 сдвинуты примерно на 20mV. Это легко поправить, сдвинув  $V_0$  в формулах на  $V_T=25m$ .

Вот теперь (рис.6) результат именно тот, какой был желателен. Все вольтамперные характеристики проходят через точку 6mA, 0.7V, но имеют различную крутизну.

Соответствующая схема вычислений приведена на рис.7.

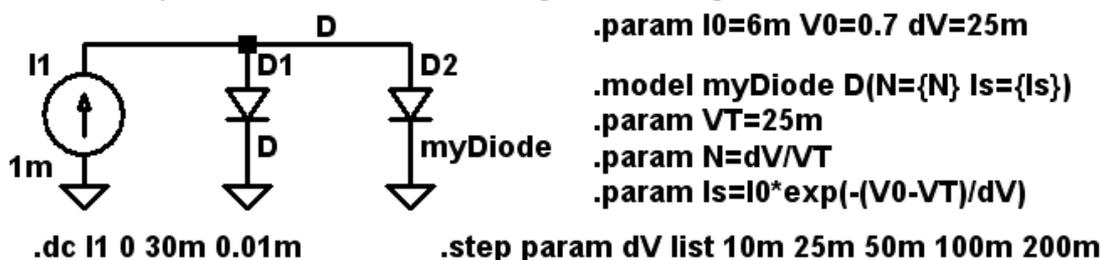


Рис.7. Схема с модифицированными формулами для подбора параметров диодов.