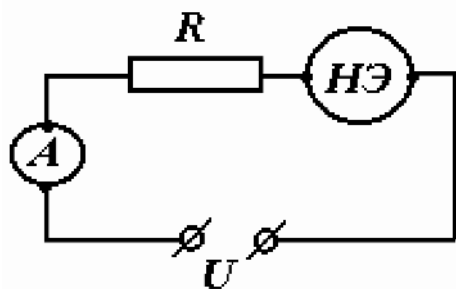
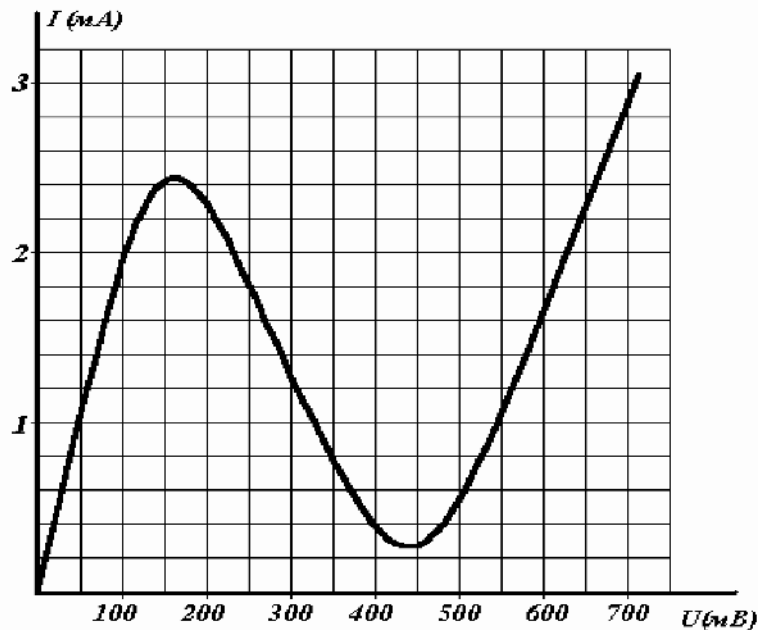


### Условие

**11-1.** Пассивный нелинейный элемент НЭ (туннельный диод) соединен последовательно с резистором сопротивлением  $R = 500$  Ом и подключен к источнику постоянного регулируемого напряжения. Вольт-амперная характеристика диода приведена на графике на отдельном бланке. Постройте график зависимости силы тока в цепи при медленном изменении напряжения источника от 0 до 2 вольт и обратном изменении от 2 до 0 вольт.



### Решение

**11.1** Обозначим напряжение на диоде  $U_1$ , тогда напряжение на резисторе будет равно  $U_0 - U_1$  (где  $U_0$  - напряжение источника). Зависимость силы тока  $I$  через диод от напряжения  $U_1$  задана в виде вольт-амперной характеристики

$$I = I(U_1). \quad (1)$$

Сила тока через резистор определяется законом Ома

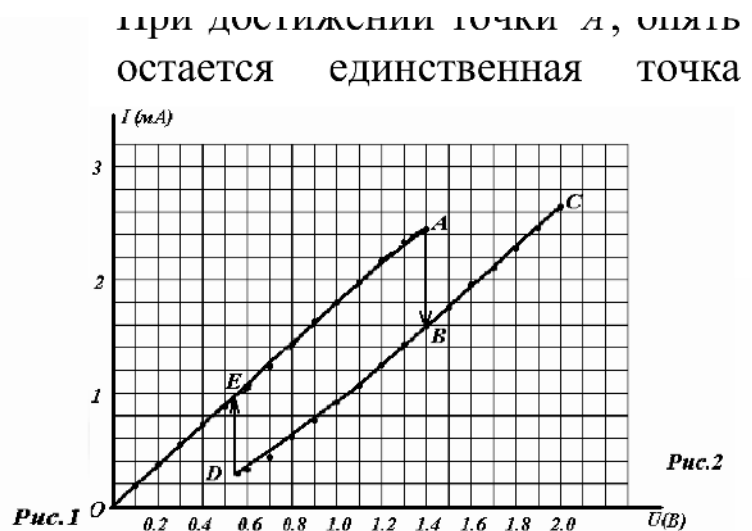
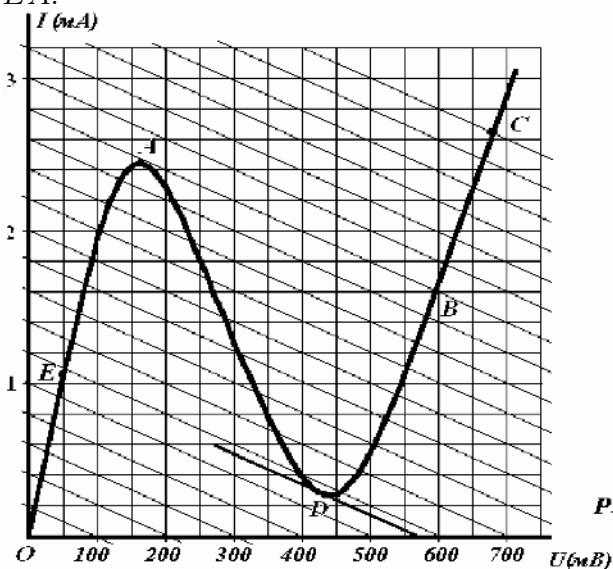
$$I = \frac{U_0 - U_1}{R}. \quad (2)$$

Так как резистор и нелинейный элемент соединены последовательно, то токи через эти элементы равны. Следовательно, ток в цепи  $I$  и напряжение  $U_1$  могут быть найдены как решения системы уравнений (1)-(2). Явный вид функциональной зависимости  $I = I(U_1)$  нам неизвестен, поэтому данную систему необходимо решать графически. Для этого на графике вольт-амперной характеристики проведем семейство прямых  $I(U_1)$ , удовлетворяющих уравнению (2) при различных значениях напряжения источника  $U_0$ . Отметим, что эти прямые пересекают горизонтальную ось в точках  $U_1 = U_0$ , а коэффициент их наклона равен  $-1/R$ . Точка пересечения прямой с вольт-амперной характеристикой диода и будет давать решение системы (1)-(2) для данного значения  $U_0$ .

Рассмотрим как будет изменяться сила тока в цепи при медленном увеличении напряжения источника. (см. рис.1). При напряжениях меньших 560 мВ имеется единственная точка пересечения (участок  $OE$ ). Когда напряжение источника превысит 560 мВ появятся три точки пересечения прямой с характеристикой диода.

Покажем, что точки, лежащие на участке  $AD$  (участок, так называемого, «отрицательного сопротивления») неустойчивы, поэтому нереализуемы. Допустим, что сила тока в цепи и напряжений на диоде соответствуют некоторой точке на участке  $AD$ . Случайное незначительное увеличение напряжения на диоде приведет к уменьшению силы тока, следовательно, к уменьшению напряжения на резисторе, что в свою очередь еще больше увеличит напряжение на диоде. Аналогичная ситуация произойдет при случайном уменьшении напряжения на диоде. Таким образом, любое случайное отклонение от равновесного значения тока на участке отрицательного сопротивления приводит к возникновению причин, уводящих систему от этого равновесного состояния.

Далее, при медленном увеличении напряжения в системе не возникает никаких причин «перескочить» на ветвь  $DC$ , поэтому будут реализовываться состояния, соответствующие участку  $EA$ .



При достижении точки A, опять остается единственная точка пересечения, но уже на участке  $BC$ , поэтому при дальнейшем увеличении напряжения будут реализовываться состояния, соответствующие этой ветви.

При обратном изменении напряжения, ситуация аналогична, только процесс пойдет по пути  $CBD$ , далее скачкообразный переход в точку  $E$ , затем по участку  $EO$ . Таким образом, в данной цепи реализуется своеобразная петля гистерезиса - значение силы тока при напряжениях источника от 560 мВ до 1200 мВ зависит от предшествующего состояния системы.

