

Нелинейные устройства на базе операционных усилителей

В стандартной схеме инвертирующего включения операционного усилителя в качестве двухполюсников R_1 и R_F могут быть включены нелинейные устройства (2-полюсники). Нелинейные 2-полюсники характеризуются прямой вольт-амперной характеристикой (ВАХ) $I=f(U)$ или обратной ВАХ $U=f(I)$. Если нелинейный 2-полюсник включен вместо резистора R_1 (рис. 1а), то используется его прямая ВАХ, если – вместо резистора R_F (рис. 1б), то – обратная.

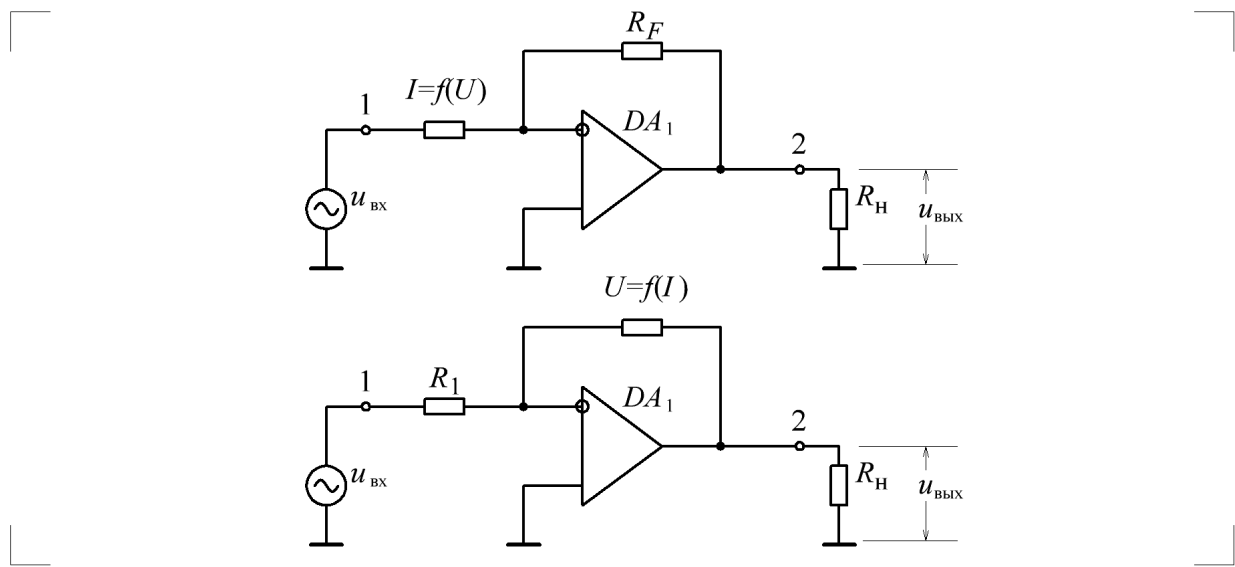


Рис. 1

Соответственно схемы называются схемой прямого функционального преобразования и схемой обратного функционального преобразования.

Рассмотрим наиболее распространенный нелинейный элемент – полупроводниковый диод. Его прямая ВАХ описывается соотношением

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right),$$

где $U_T = \frac{kT}{q}$, k – постоянная Больцмана, q – заряд электрона, T – температура, выраженная в Кельвинах, I_0 – обратный ток перехода.

Обратная ВАХ диода описывается формулой $U = U_T \cdot \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right)$. Соответственно эти ВАХ изображены на рис. 2.

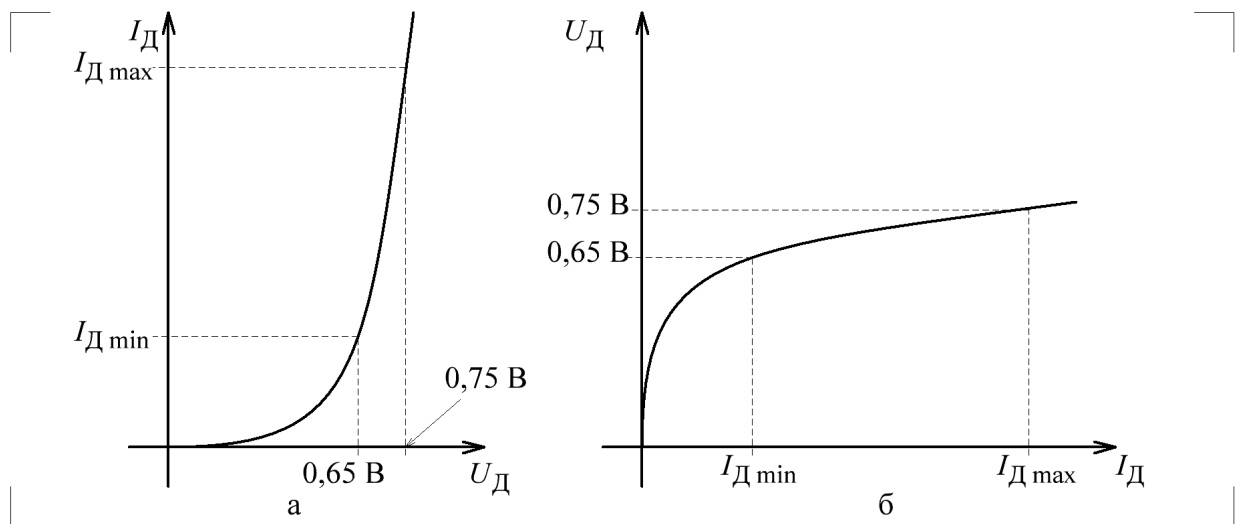


Рис. 2

Включим диод в схему инвертирующего усилителя так, как показано на рис. 3.

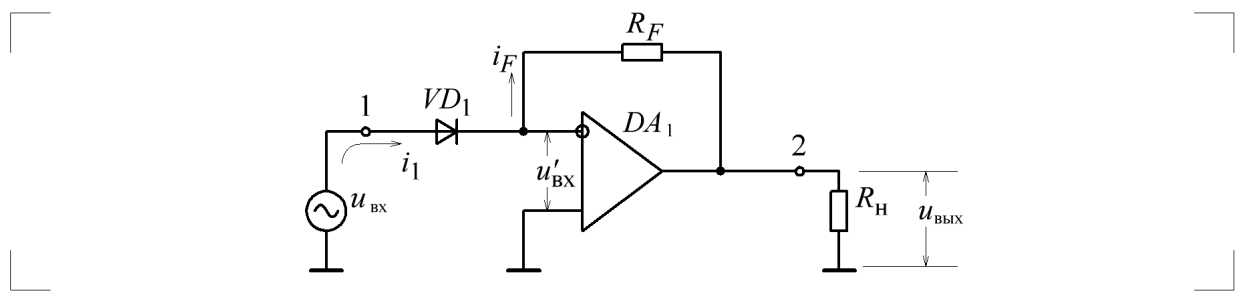


Рис. 3

В этой схеме $i_1 = I_0 \left(e^{\frac{u_{ВХ}}{U_T}} - 1 \right)$, а $i_F = -\frac{u_{ВЫХ}}{R_F}$.

Пользуясь методикой приближенного анализа схем на операционных уси-

лителях, на основании которой $i_1 = i_F$, получаем $u_{ВЫХ} = -R_F I_0 \left(e^{\frac{u_{ВХ}}{U_T}} - 1 \right)$.

Передачная характеристика, соответствующая этой формуле приведена на рис. 4а.

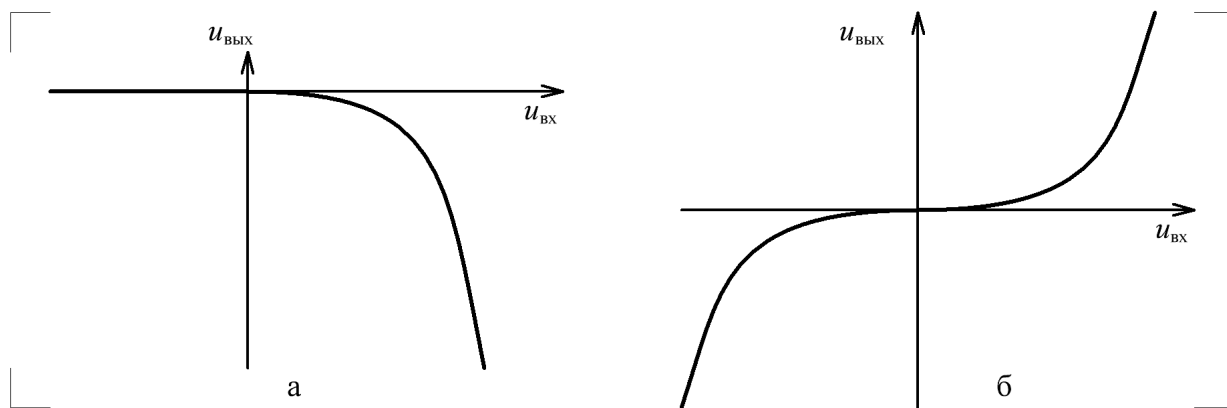


Рис. 4

Для получения симметричной характеристики без инверсии знака напряжения (рис. 4б) в схему необходимо добавить второй диод и операционный усилитель в качестве инвертора знака напряжения (Рис. 5).

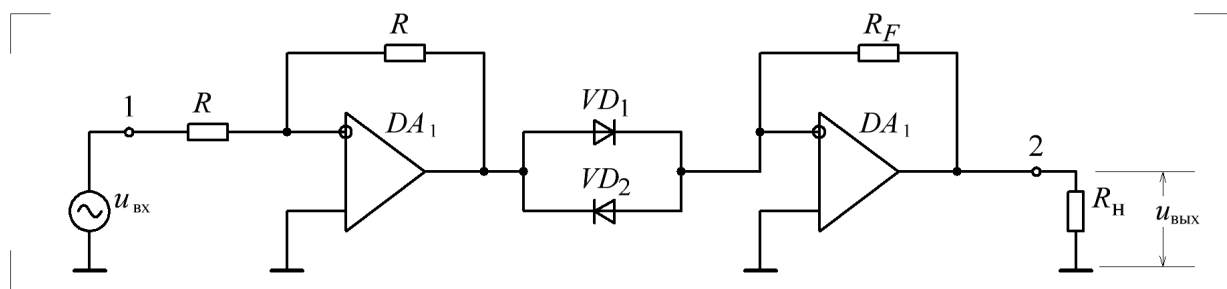


Рис. 5

Характеристика имеет экспоненциальный вид и симметрична относительно начала координат.

Для получения логарифмической передаточной характеристики диод следует установить в цепь обратной связи (рис. 6).

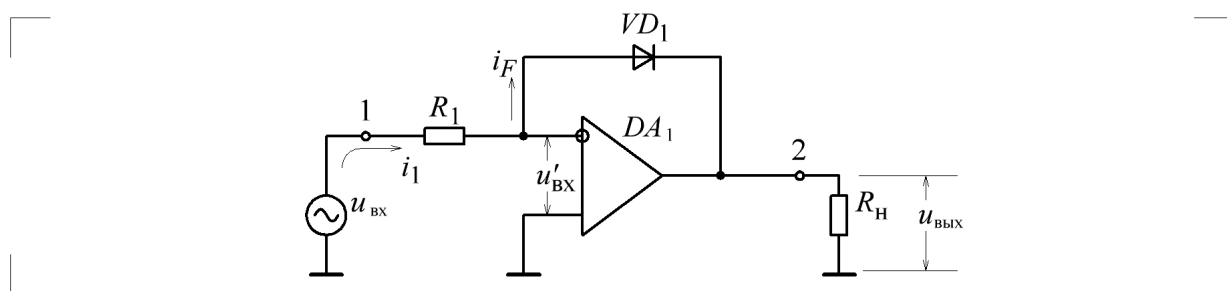


Рис. 6

В этой схеме $i_1 = \frac{u_{ВХ}}{R_1}$ и $i_F = I_0 \left(e^{\frac{-u_{ВЫХ}}{U_T}} - 1 \right)$. Приравнивая эти токи,

получаем $u_{\text{ВЫХ}} = -U_T \ln\left(\frac{u_{\text{ВХ}}}{R_1 I_0}\right)$.

Эта зависимость приведена на рис. 7а.

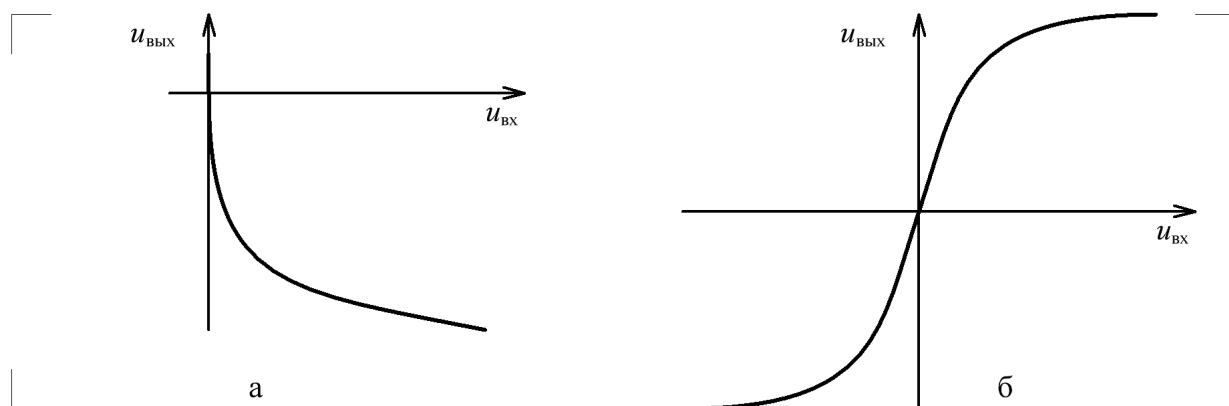


Рис. 7

Для получения симметричной характеристики без инверсии знака напряжения (рис. 7б) следует также дополнить схему вторым диодом и операционным усилителем в инвертирующем включении (рис. 8).

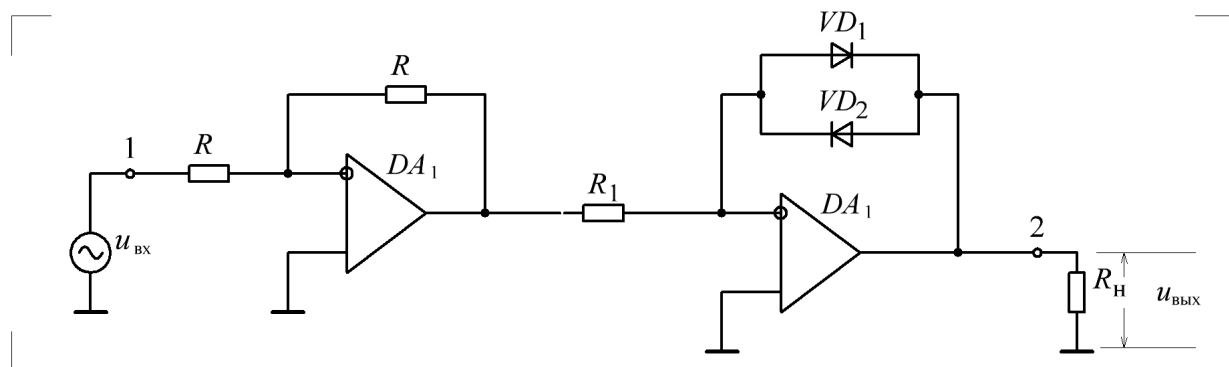


Рис. 8

Схема реализует "мягкое" ограничение сигнала. Это означает, что при подаче на вход гармонического напряжения с амплитудой, соизмеримой с напряжением открывания диода (0,7 В) и выше, напряжение на выходе будет иметь форму с "приплюснутыми" вершинами (рис. 9).

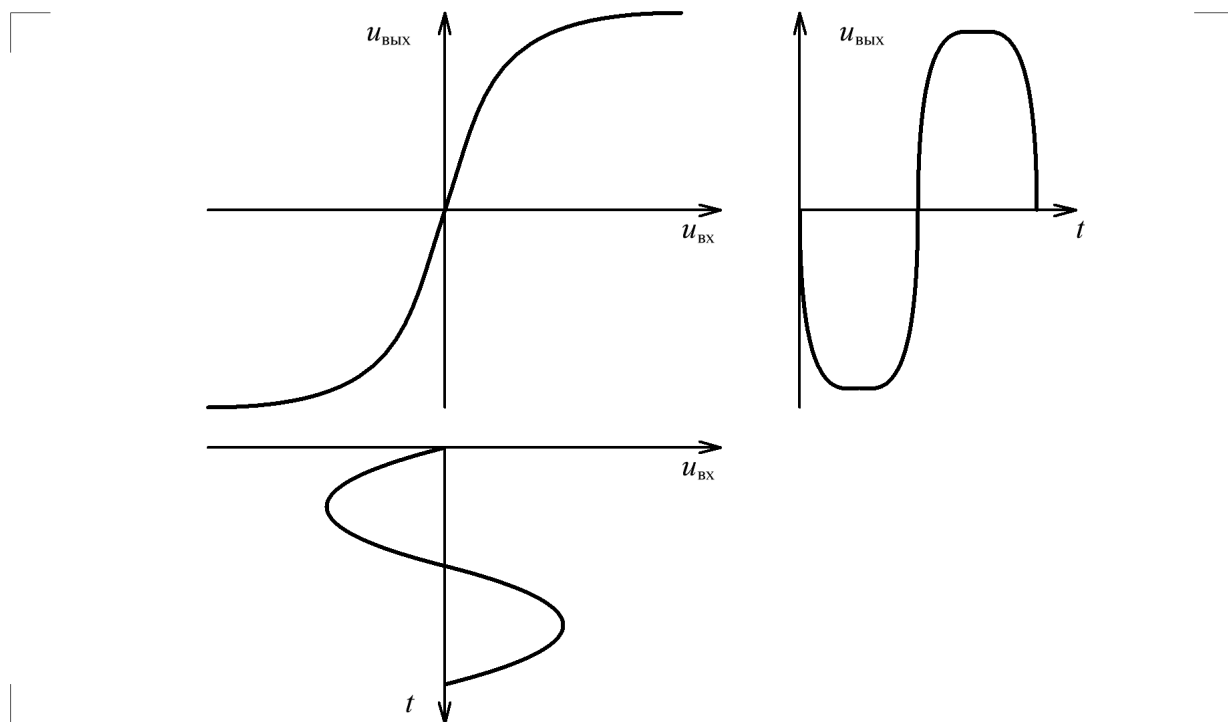


Рис. 9

Вид выходного сигнала, полученный в результате имитационного моделирования данной схемы, приведен на рис. 10.

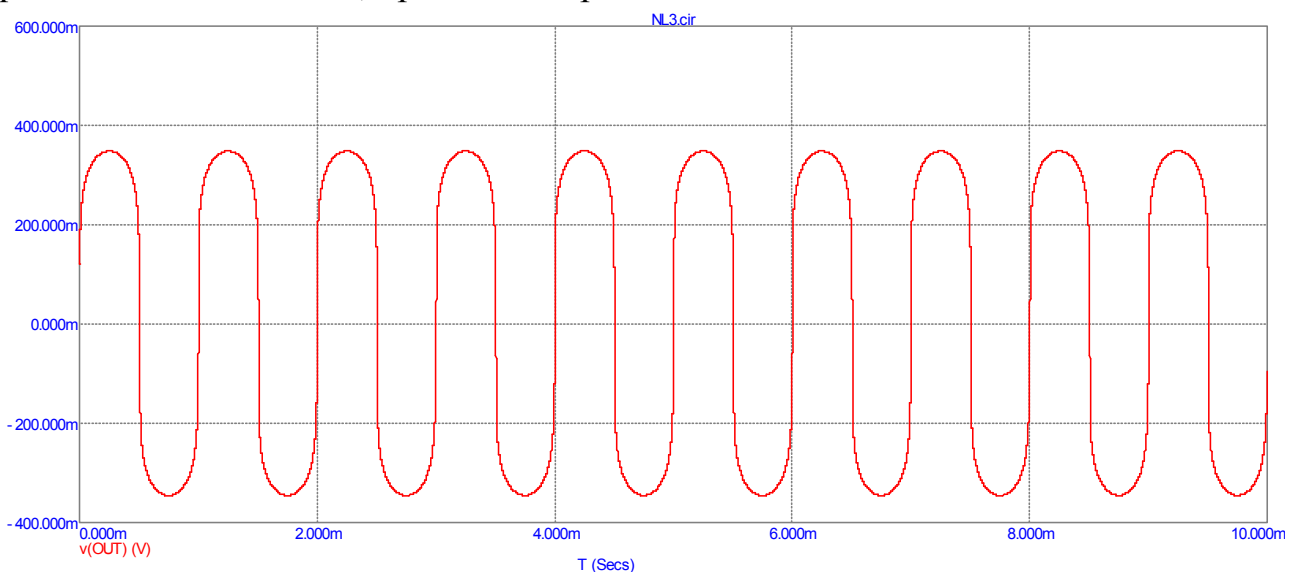


Рис. 10

Такая форма выходного сигнала характеризуется наличием высших гармонических составляющих, появляющихся вследствие нелинейных искажений гармонического сигнала.

Однако эта схема иногда используется для решения обратной задачи – получения на выходе сигнала, близкого к гармоническому при подаче на вход напряжения треугольной формы (рис. 10).

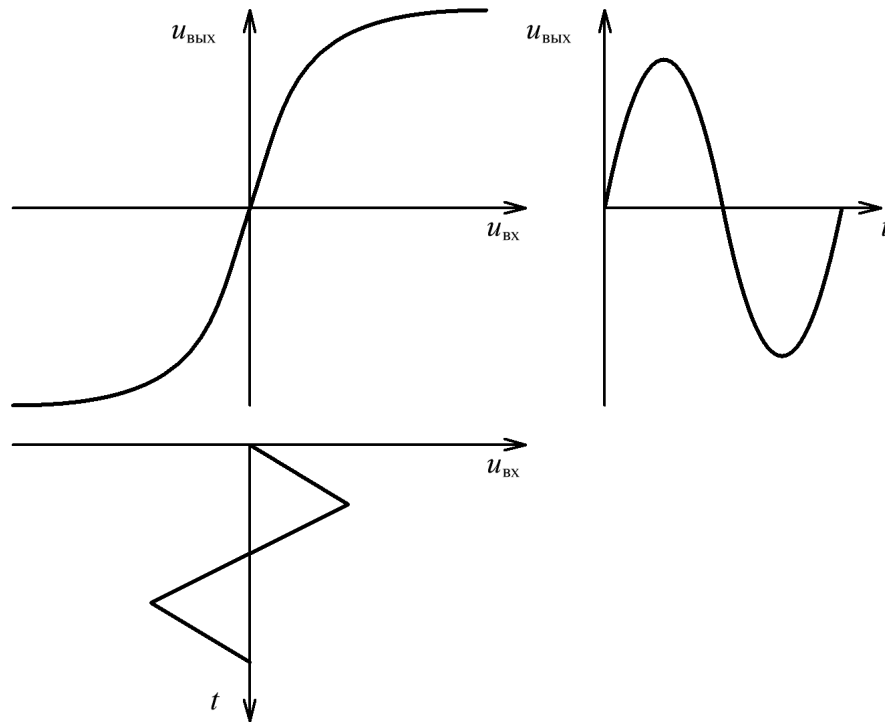


Рис. 10

Данная операция находит применение при построении функциональных генераторов – генераторов сигналов различной формы, например прямоугольной, треугольной и синусоидальной. В этом случае исходный генератор строится для получения сигнала прямоугольной формы, треугольный сигнал получается на выходе интегратора, а синусоидальной – на выходе рассматриваемого логарифмического преобразователя.