

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ ОБРАТНО ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

Рассматриваемый функциональный преобразователь построен на принципе кусочно-линейной аппроксимации (рис. 1), осуществляющей равномерное приближение гиперболы с некоторой наперед заданной относительной погрешностью  $\Delta$ . Если исходить из диодно-резисторной реализации аппроксиматора, то можно записать

$$\Delta = 1 - \frac{U_{\text{э}i} I - R_{\text{э}i} I^2}{K}, \quad (1)$$

где  $I$  – независимая (входная) координата преобразователя, которая в данном случае является током;  $K$  – коэффициент гиперболы зависимости, подлежащей аппроксимации;  $U_{\text{э}i}$ ,  $R_{\text{э}i}$  – эквивалентные параметры кусочно-линейной аппроксимирующей цепи на некотором  $i$ -ом участке аппроксимации (рис.1). Задачу расчета параметров аппроксимирующей ломаной целесообразно решить в следующей постановке: пусть заданы погрешность  $\Delta$ , максимальное значение входной координаты  $I_{\text{max}}$  ( $U_{\text{max}}$ ), минимальное значение выходной координаты гиперболы  $U_{\text{min}}$  и диапазон изменения переменных  $D$ ; необходимо определить число участков линейной аппроксимации  $n$  и параметры  $U_{\text{э}i}$ ,  $R_{\text{э}i}$  на каждом участке. Так как в данном случае аппроксимируемая функция – вогнутая и имеет отличную от нуля вторую производную, то задача может быть решена аналитически [1]. Пусть первый отрезок аппроксимации ограничен  $I_1$ ,  $I_{\text{max}}$ , тогда максимальные ошибки имеют место на границах отрезка, а также – внутри его. Известно, что наилучшее равномерное приближение достигнуто, если все максимальные ошибки на участке аппроксимации равны между собой [1]. Определить максимальную ошибку внутри первого участка аппроксимации можно, приравняв нулю первую производную относительной ошибки по входной координате (1):

$$\Delta' = (U_{\text{э}i} - 2R_{\text{э}i} I_{\Delta}) / K = 0,$$

откуда  $I_{\Delta} = U_{\text{э}i} / 2R_{\text{э}i}$  и далее

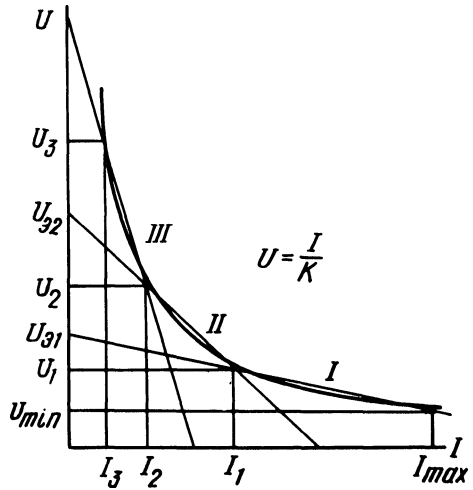


Рис. 1. Кусочно-линейная аппроксимация гиперболы.

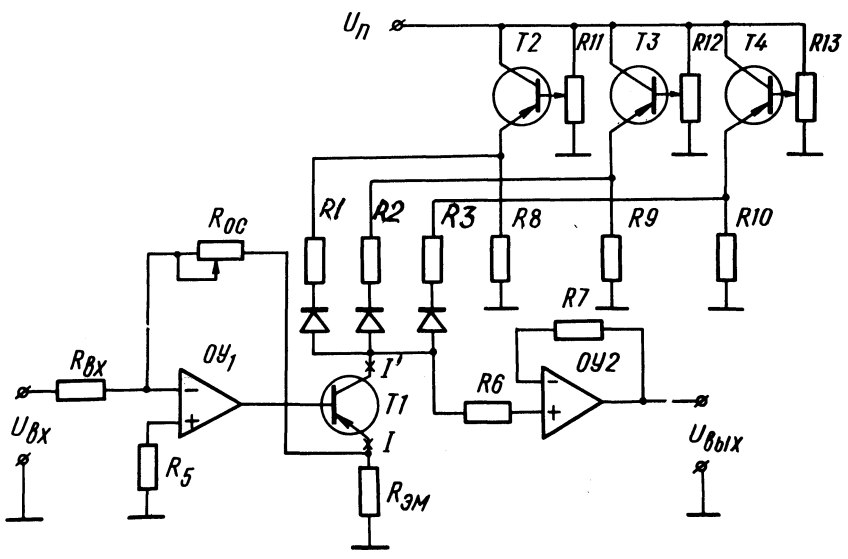


Рис. 2. Схема функционального формирователя обратно-пропорциональной зависимости.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_{\max 1} = 1 - (U_{\text{э}i \max} I_{\text{э}i \max} - R_{\text{э}i} I_{\text{э}i \max}^2) / K; \\ \Delta_{\max 2} = 1 - \frac{U_{\text{э}1} I_{\text{э}1} - R_{\text{э}1} I_{\text{э}1}^2}{K}; \\ \Delta_{\max 3} = 1 - \frac{U_{\text{э}1}^2}{4KR_{\text{э}1}}; \\ \Delta_{\max 1} = \Delta_{\max 2} = \Delta_{\max 3} = \Delta_{\text{зад}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Решая совместно уравнения (2), получим для  $i$ -го участка аппроксимации

$$U_{\text{э}i} = \frac{4Ka}{I_{\max} A^{i-1}} (a + \sqrt{\Delta_{\text{зад}}}); \quad (3)$$

$$R_{\text{э}i} = \frac{2K}{I_{\max}^2 A^{2i-2}} (a + \sqrt{\Delta_{\text{зад}}}); \quad (4)$$

$$I_i = I_{\max} A^i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad (5)$$

$$A = \frac{a - \sqrt{\Delta_{\text{зад}}}}{a + \sqrt{\Delta_{\text{зад}}}}; \quad a = \sqrt{\frac{1 + \Delta_{\text{зад}}}{2}}; \quad K = U_{\min} I_{\max}.$$

Определим границу последнего ( $n$ -го) участка аппроксимации по току

$$I_n = I_{\max} A^n,$$

а также учтем, что  $I_{\max} / I_n = D$  и выразим требуемое число участков аппроксимации в виде

$$n = -\lg D / \lg A. \quad (6)$$

На рис. 2 приведена электрическая схема формирователя, аппроксимирующего гиперболу тремя линейными участками. При диапазоне  $D = 10$  и  $n = 3$  относительная ошибка не превосходит 7%. Собственно аппроксиматор состоит из резисторов

$R_1, R_2, R_3$ , диодов и транзисторов. Транзисторы  $T_2-T_4$  являются эмиттерными повторителями и применяются для того, чтобы избежать необходимости в низкоомных номиналах резисторов  $R_{11}-R_{13}$ . Усилитель  $OY_2$  также включен по схеме повторителя напряжения, чем исключается влияние нагрузки на выходное напряжение аппроксиматора. Операционный усилитель  $OY_1$  необходим для преобразования входного напряжения  $U_{вх}$  в ток  $I'$ , причем

$$I' = I \frac{1+B_{ст}}{B_{ст}},$$

Расчет параметров аппроксиматоров можно производить по формулам

$$R_i = \frac{R_{эi} R_{эi+1}}{R_{эi+1} - R_{эi}}; \quad (7)$$

$$U_i = \frac{R_{эi+1} U_{эi} - R_{эi} U_{эi+1}}{R_{эi+1} - R_{эi}}; \quad (8)$$

$$R_{эм} = \frac{(U_{\min} - \Delta U_{кэнас}) B_{ст} + 1}{B_{ст} I_{\max}}; \quad (9)$$

$$\frac{R_{вх}}{R_{ос}} = \frac{U_{вх \max}}{U_{\min} - \Delta U_{экнас}}; \quad (10)$$

где  $\Delta U_{экнас}$  - напряжение "коллектор-эмиттер" транзистора  $T_1$  в режиме насыщения. Опытная проверка функционального формирователя показывает, что схема позволяет получить максимальную относительную погрешность 1% при  $D = 10 \dots 15$ ,  $n = 8$  (транзисторы  $T_1 \dots T_{n+1}$  - 2Т203Г, усилители  $OY_1 \dots OY_2$  - 1УТ402, диоды  $D_1 \dots D_n$  - Д-310). Более высокая точность не может быть получена только за счет увеличения числа участков линейной аппроксимации, в этом случае необходима компенсация изменения  $B_{ст}$ , а также - падения напряжения на диодах аппроксиматора.

#### Л и т е р а т у р а

1. Алексеев Г.И. Воспроизведение функции средствами цифро-аналоговой вычислительной техники. Минск, 1976.