

Ю. В. Пшеничников

О ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИОДНО-РЕГЕНЕРАТИВНЫХ НУЛЬ-ОРГАНОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

В быстродействующих цифровых автоматических компенсаторах в качестве схем сравнения часто используются так называемые диодно-регенеративные нуль-органы, т. е. нуль-органы со сравнивающим диодом в цепи положительной обратной связи.

Подобные схемы, как правило, строятся на электронных лампах [1, 2, 3]. Диодно-регенеративные нуль-органы на полупроводниковых приборах применяются значительно реже, главным образом, из-за существенного влияния температуры на порог чувствительности.

В предлагаемой статье рассматриваются основные факторы, определяющие температурную погрешность нуль-органов на полупроводниковых приборах.

Такой нуль-орган удобно рассматривать как нелинейный усилитель, охваченный положительной обратной связью, в цепи которой находится сравнивающий диод (рис. 1 а), U_x и $U_{эТ}$ — сравниваемые напряжения, емкость C разделяет цепь сравнения и вход усилителя.

Эквивалентная схема подобного устройства приведена на рис. 1 б.

Здесь диод заменен активным сопротивлением R_d , величина которого зависит от разности сравниваемых напряжений $\Delta U = U_{эТ} - U_x$, усилитель со стороны выхода представлен в виде эквивалентного генератора с $E = R_0 U_b$ (K_0 — коэффициент усиления в режиме холостого хода) и внутренним сопротивлением, равным выходному сопротивлению усилителя $R_{вых}$, емкости $C1$ и $C2$ учитывают инерционные свойства усилителя и паразитные емкости входа и выхода:

Определим в общем виде условие начала регенеративного процесса.

Согласно принятым на рис. 1б обозначениям имеем:

$$i_1 = i_c = i_1 + i_{c1} = i_2 - i_{c2}, \quad (1)$$

$$i_1 - i_c = C \frac{dU_c}{dt}, \quad i_1 = \frac{U_{BX}}{R_{BX}},$$

$$i_{c1} = C_1 \frac{dU_{BX}}{dt}, \quad i_{c2} = C_2 \frac{dU_{ВЛХ}}{dt}. \quad (2)$$

$$U_{ВЛХ} = U_d + U_c + U_{BX} - CR_d \frac{dU_c}{dt} + U_c + U_{дх}, \quad (3)$$

где U_d — падение напряжения на диоде за счет тока обратной связи.

$$i_1 = \frac{K_0 U_{BX} - U_{ВЛХ}}{R_{ВЛХ}} = \frac{(K_0 - 1) U_{BX}}{R_{ВЛХ}} - \frac{CR_d}{R_{ВЛХ}} \frac{dU_c}{dt} - \frac{U_c}{R_{ВЛХ}}. \quad (4)$$

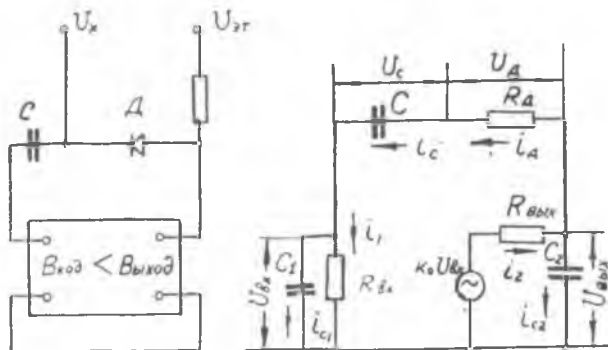


Рис. 1.

Из (1) и (2) имеем

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{U_{BX}}{C \cdot R_{BX}} + \frac{C_1}{C} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt}. \quad (5)$$

Дифференцируя (7) по времени, получим:

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} = \frac{1}{C \cdot R_{BX}} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} + \frac{C_1}{C} \cdot \frac{d^2 U_{BX}}{dt^2}. \quad (6)$$

$$\frac{d^3 U_c}{dt^3} = \frac{1}{C \cdot R_{BX}} \cdot \frac{d^2 U_{BX}}{dt^2} + \frac{C_1}{C} \cdot \frac{d^3 U_{BX}}{dt^3}. \quad (7)$$

С учетом (2), (4), (5), (6) и (7) выражение

$$i_c = i_2 - i_{c2}, \quad (1)$$

после дифференцирования приводится к виду:

$$R_d C_1 C_2 \frac{d^3 U_{\text{вх}}}{dt^3} + \left(C_1 + \frac{R_d \cdot C_1}{R_{\text{вых}}} + \frac{R_d C_2}{R_{\text{вх}}} + C_2 + \frac{C_1 C_2}{C} \right) \frac{d^2 U_{\text{вх}}}{dt^2} + \left(\frac{1}{R_{\text{вх}}} - \frac{K_0 - 1}{R_{\text{вх}}} + \frac{R_d}{R_{\text{вх}} \cdot R_{\text{вых}}} + \frac{C_1}{C \cdot R_{\text{вых}}} + \frac{C_2}{C \cdot R_{\text{вх}}} \right) \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} + \frac{U_{\text{вх}}}{C \cdot R_{\text{вх}} \cdot R_{\text{вых}}} = 0. \quad (8)$$

Так как $R_{\text{вх}}$, $R_{\text{вых}}$ и K_0 — функции $U_{\text{вх}}$, то дифференциальное уравнение (8) является нелинейным. Это уравнение достаточно точно описывает весь регенеративный процесс, протекающий в нуль-органе. Для нашего случая представляет интерес лишь начало регенерации.

Известно [4], что малые паразитные параметры в подобных системах (емкости C_1 и C_2 в нашем случае) определяют, в основном, длительность фронтов генерируемых импульсов и при определении условия начала регенерации ими можно пренебречь. При этом мы переходим к разрывной трактовке регенеративного процесса, который описывается нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка, полученным из (8) при $C_1 = C_2 = 0$.

$$\left(\frac{K_0 - 1}{R_{\text{вых}}} - \frac{1}{R_{\text{вх}}} - \frac{R_d}{R_{\text{вх}} \cdot R_{\text{вых}}} \right) \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} - \frac{U_{\text{вх}}}{C \cdot R_{\text{вх}} \cdot R_{\text{вых}}} = 0. \quad (9)$$

В работе [5] показано, что условием возникновения разрывных колебаний в системе, описываемой уравнением вида

$$A(U_{\text{вх}}) \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} - B(U_{\text{вх}}) \cdot U_{\text{вх}} = 0,$$

где $B(U_{\text{вх}}) > 0$ при любых значениях $U_{\text{вх}}$, является неравенство $A(U_{\text{вх}}) > 0$. В нашем случае это соответствует

$$\frac{K_0 - 1}{R_{\text{вх}}} - \frac{1}{R_{\text{вх}}} - \frac{R_d}{R_{\text{вх}} \cdot R_{\text{вых}}} > 0. \quad (10)$$

Решая неравенство (10) относительно R_d и учитывая (2) и (4), получим следующее условие начала регенерации диодно-регенеративного нуль-органа:

$$R_d < (K - 1) R_{\text{вх}}, \quad (11)$$

где K — коэффициент усиления нагруженного усилителя. Так как в большинстве практических случаев $K \gg 1$, то условие (11) можно упростить:

$$R_d < K \cdot R_{\text{вх}} \quad \text{или} \quad \frac{1}{R_d} > \frac{1}{K \cdot R_{\text{вх}}}. \quad (12)$$

Условие начала регенерации в таком виде более удобно для определения температурной погрешности диодно-регенеративного нуль-органа на полупроводниковых приборах, чем условие, полу-

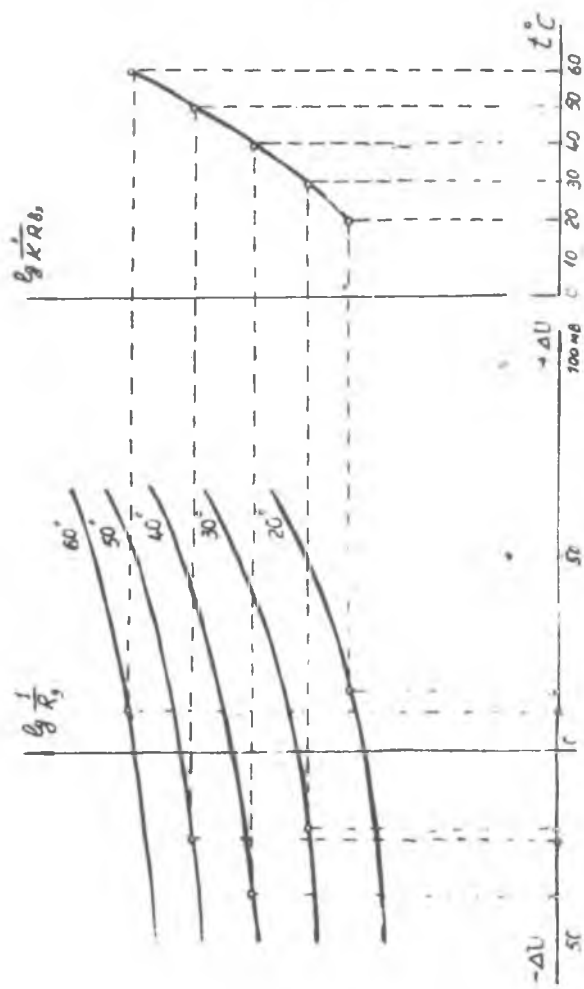


Рис. 2.

ченное в работе [2] применительно к аналогичным нуль-органам на электронных лампах.

Выражение (12) дает возможность определить зависимость порога срабатывания нуль-органа — ΔU_c от температуры. Действительно, так как R_d , $R_{вх}$ и K — функции температуры, а R_d , кроме того, является функцией ΔU , то из равенства

$$\frac{1}{R_d} = \frac{1}{K \cdot R_{вх}}, \quad (13)$$

характеризующего режим, предельно близкий к началу регенеративного процесса, можно определить аналитически функцию $\Delta U_{ср} = f(t^\circ)$.

Однако точные аналитические выражения для исходных функций весьма сложны. Целесообразнее определить зависимость $\Delta U_{ср}(t^\circ)$ графоаналитическим методом, используя экспериментально полученные кривые

$$R_d(\Delta U, t^\circ), \quad R_{вх}(t^\circ), \quad K(t^\circ).$$

По значениям $R_{вх}$ и K при различных температурах можно построить зависимость $\frac{1}{K \cdot R_{вх}}(t^\circ)$.

Построение интересующей нас зависимости $\Delta U_{ср}(t^\circ)$ по найденной $\frac{1}{K R_{вх}}(t^\circ)$ и семейству *мо*-вольтных характеристик сравнивающего диода ясно из рис. 2.

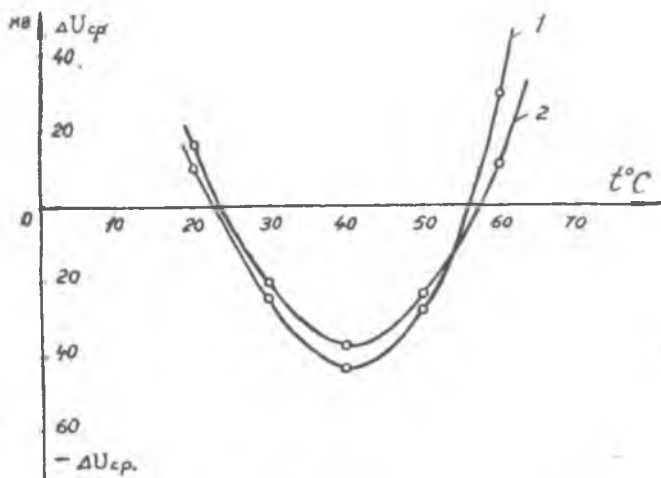


Рис. 3.

На рис. 3 приведены экспериментально снятая зависимость $\Delta U_{ср}(t^\circ)$ (кривая 1) и зависимость, полученная при помощи предлагаемого графо-аналитического метода (кривая 2) для ди-

одно-регенеративного нуля-органа, построенного на транзисторах типа П16Б по аналогии с электронно-ламповыми схемами. В качестве сравнивающего диода применялся такой же транзистор в диодном включении (коллектор соединен с базой).

Очевидно, что использование подобного нуля-органа в сколь угодно широком диапазоне температур невозможно из-за слишком большой нестабильности порога чувствительности.

В 1956 году в работе [6] был предложен новый принцип построения диодно-регенеративных нуля-органов, заключающийся в том, что сравнивающие диоды включены в цепи положительной и отрицательной обратных связей таким образом, что знак и величина результирующей обратной связи зависят от знака и величины разности сравниваемых напряжений — ΔU .

Одна из возможных схем такого типа приведена на рис. 4.

Для определения условия начала регенерации представим нуля-орган в виде нелинейного дифференциального усилителя, охваченного положительной и отрицательной обратной связью через сравнивающие диоды (рис. 5 а), эквивалентная схема такого усилителя приведена на рис. 5 б, где R^+ и R^- соответственно сопротивления диодов в цепи положительной и отрицательной обратных связей. По уже изложенным соображениям пренебрегаем инерционностью усилителя и паразитными емкостями входа и выхода.

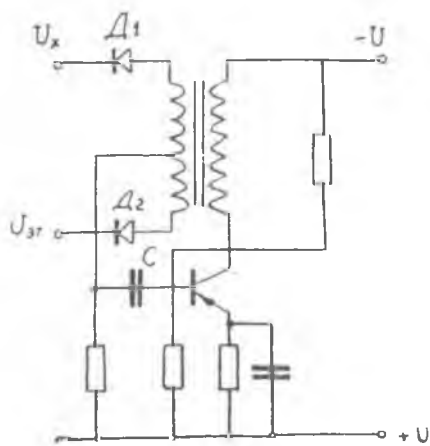


Рис. 4.

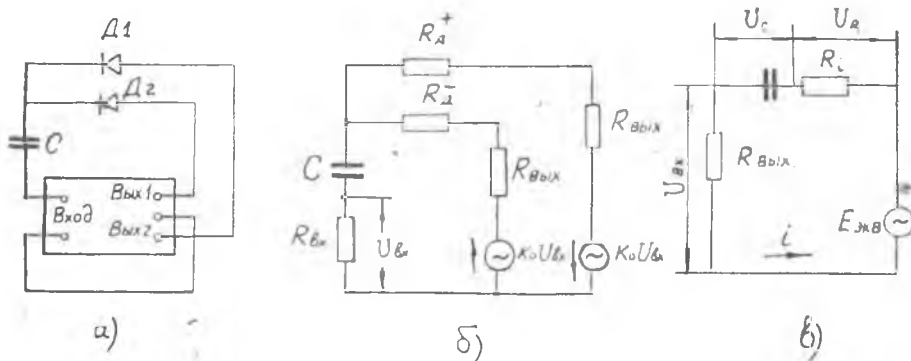


Рис. 5.

Заменим два источника э. д. с. одним эквивалентным источником с внутренним сопротивлением R_i , в котором учтены и сопротивления обоих диодов. Эквивалентная схема примет вид, приведенный на рис. 5 в, где

$$E_{\text{экв}} = \frac{K_0 U_{\text{вх}} (R_2 - R_2^+)}{R_1^- - R_1^+ - 2R_{\text{вмх}}} \quad (14)$$

$$R_i = \frac{(R_2 - R_{\text{вмх}})(R_2^+ + R_{\text{вмх}})}{R_2 - R_2^+ - 2R_{\text{вмх}}} \quad (15)$$

Выражения (14) и (15) можно упростить, если вместо K_0 ввести K — коэффициент усиления нагруженного усилителя.

В этом случае $R_{\text{вмх}}$ будет учтено в величине этого коэффициента и выражения (14) и (15) примут вид:

$$E_{\text{экв}} = \frac{KU_{\text{вх}} (R_2 - R_2^+)}{R_2 - R_2^+} \quad (16)$$

$$R_i = \frac{R_2 - R_2^+}{R_2 - R_2^+} \quad (17)$$

В соответствии с обозначениями (рис. 5 в) имеем

$$U_{\text{вх}} = i \cdot R_{\text{вх}}, \quad U_c = \frac{1}{C} \int_0^t i \cdot dt \quad (18)$$

$$E_{\text{экв}} = U_{\text{вх}} + i \cdot R_i = \frac{1}{C} \int_0^t i \cdot dt \quad (19)$$

С учетом (16), (17) и (18) выражение (19) после дифференцирования приведем к следующему виду:

$$\left[\frac{K(R_2 - R_2^+) - R_2 \cdot R_2^+}{(R_2 - R_2^+) R_{\text{вх}}} - 1 \right] \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} - \frac{U_{\text{вх}}}{C \cdot R_{\text{вх}}} = 0 \quad (20)$$

Уравнение (20) такого же вида, как и уравнение (8). Следовательно, условием начала регенерации будет неравенство:

$$\frac{K(R_2 - R_2^+) - R_2 \cdot R_2^+}{(R_2 - R_2^+) R_{\text{вх}}} - 1 > 0 \quad (21)$$

Откуда

$$R_2 < \frac{(K - 1) R_2 \cdot R_{\text{вх}}}{(K - 1) R_{\text{вх}} + R_2^+} \quad (22)$$

Так как в большинстве практических случаев $K \gg 1$, то неравенство (22) можно привести к более удобному для рассмотрения виду:

$$\frac{1}{R_d^+} - \frac{1}{R_d^-} > \frac{1}{KR_{\text{вы}}}. \quad (23)$$

Из выражения (23) видно, что температурная погрешность подобных нуль-органов меньше, чем у нуль-органов с одной лишь положительной обратной связью, так как разность двух одновременно убывающих или возрастающих величин изменяется в меньшей степени, чем каждая величина в отдельности. Кроме того, в подобных схемах при одинаковых сравнивающих диодах исключена возможность возникновения регенеративного процесса при $\Delta U < 0$.

В пределе, если $\frac{1}{K \cdot R_{\text{вы}}} = 0$, то $\Delta U_{\text{ср}} = 0$ и мы имеем идеальный нуль-орган с полной температурной компенсацией.

В действительности $\frac{1}{KR_{\text{вы}}} \neq 0$ и для определения зависимости $\Delta U_{\text{ср}}(t^\circ)$ снова обратимся к графо-аналитическому методу.

Зная *мо*-вольтные характеристики сравнивающих диодов и параметры элементов цепи сравнения, можно построить семейство характеристик, выражающих зависимость разности $\frac{1}{R_d^+} - \frac{1}{R_d^-}$ от ΔU при различных температурах.

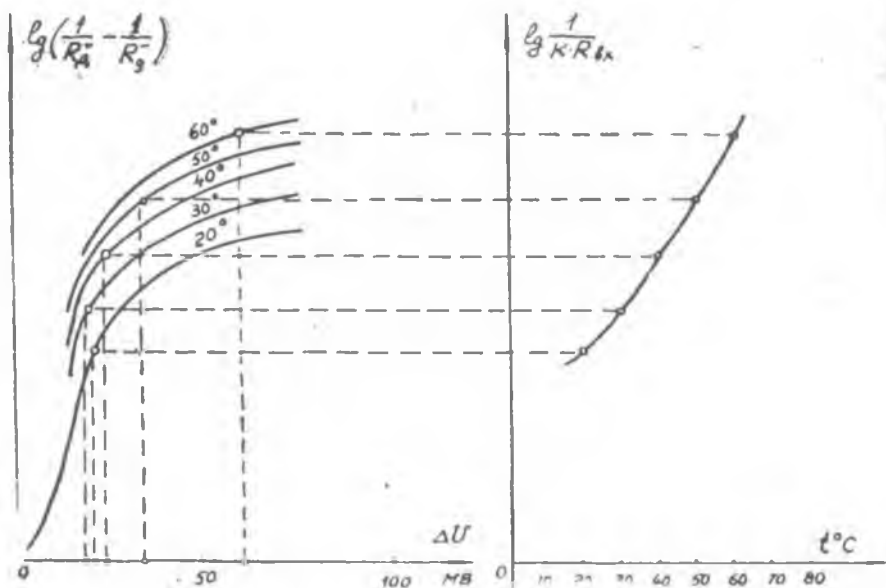


Рис. 6.

Построение интересующей нас зависимости ясно из рис. 6. На рис. 7 приведены экспериментально снятая зависимость $\Delta U_{\text{ср}}(t)$ (кривая 1) и зависимость, полученная при помощи предлагаемого графо-аналитического метода (кривая 2), для нуля-органа, схема которого представлена на рис. 4.

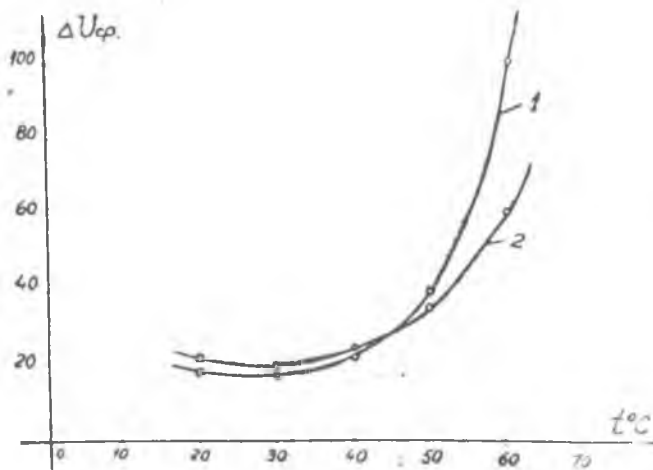


Рис. 7.

Из сравнения рис. 3 и 7 видно, что нуль-органы второго типа имеют значительно меньшую нестабильность порога срабатывания, чем нуль-органы первого типа, даже без применения дополнительных мер по улучшению температурной погрешности.

ВЫВОДЫ

1. Диодно-регенеративные нуль-органы на полупроводниковых приборах с одной положительной обратной связью имеют большую температурную нестабильность порога чувствительности и могут применяться только при условии термостатирования всей схемы.

2. Диодно-регенеративные нуль-органы с положительной и отрицательной обратными связями имеют значительно меньшую температурную нестабильность и в диапазоне температур от $+15$ до $+30^\circ$ могут применяться без дополнительных мер по уменьшению этой нестабильности.

3. Предложенный графо-аналитический метод анализа зависимости порога чувствительности от температуры позволяет определить параметры сравнивающих диодов и усилителя для построения нуля-органа с заданной чувствительностью при заданной температуре.

4. Анализ влияния параметров элементов схемы на величину порога чувствительности позволяет разработать ряд дополнительных мер по уменьшению температурной погрешности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генерирование колебаний специальной формы Изд-во «Советское радио», Москва, 1951.

2. Л. А. Меерович, А. Г. Зеличенко «Импульсная техника». Изд-во «Советское радио», Москва, 1954.

3. Я. Миллман и Г. Тауб. «Импульсные и цифровые устройства», Госэнергоиздат, 1960.

4. А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин «Теория колебаний». Физматгиз, 1959.

5. В. Н. Яковлев «Исследование элементов импульсных устройств на полупроводниковых приборах». Диссертация. Киевский политехнический институт, 1957.

6. M. C. Hollie, A new circuit for amplitude comparison, ISA Journal, 1956, v. 3, № 4.